

Beitrag zur Stabilität und Automatisierung von CFK-Produktionsprozessen

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Dieter Meiners

aus Nordenham

Genehmigt von der
Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
30.11.2007

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die bei der Fakultät für Material- und Naturwissenschaften der Technischen Universität Clausthal eingereichte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe verfasst und die benutzten Hilfsmittel vollständig angegeben habe.

26.10.2007

Datum

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Albi'.

Unterschrift

Vorwort

Die vorliegende Dissertationsarbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Leiter des Airbus Centre of Excellence Vertical Tail Plane sowie Leiter des Airbus Werkes in Stade.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann vom Fachbereich Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik der Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften der Technischen Universität Clausthal-Zellerfeld danke ich an dieser Stelle besonders für die interessanten vertiefenden Gespräche zum Thema sowie für die wissenschaftliche Betreuung und die kritische Durchsicht der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Axel Herrmann vom Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen und vom Faserinstitut Bremen e.V. für die kollegiale Zusammenarbeit, die maßgeblich zum Erfolg der Arbeit beigetragen hat, sowie für die Übernahme des Korreferats.

Dank gebührt dem Unternehmen Airbus und den Kollegen für die Unterstützung und Zusammenarbeit.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie für die Unterstützung und die Akzeptanz für die zusätzlichen Einschränkungen bedanken.



Dieter Meiners

im Oktober 2007

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	CFK im Produktionsprozess.....	2
2.1	Organisationstypen	3
2.1.1	Produktbezogene Organisation	4
2.1.2	Prozessbezogene Organisation	6
2.1.3	Synthese der Organisationsformen	8
2.2	Teilefertigung	9
2.2.1	Aufgaben der Teilefertigung	10
2.2.2	Komplexität in manuellen Einzelteillfertigungsprozessen am Beispiel einer Airbus A400M-Flügelschale	11
2.3	Montage	15
2.3.1	Aufgaben der Montage	15
2.3.2	Komplexität in Montageprozessen	16
2.3.2.1	Material- und Werkstoffeigenschaften	16
2.3.2.2	Bauteiltoleranzen	17
2.3.2.3	Verbindungselemente	19
2.3.3	Vormontage	22
2.3.4	Strukturmontage	23
2.3.5	Ausrüstungsmontage	27
3	Automatisierungsmöglichkeiten in der CFK-Teilefertigung zur Komplexitätsreduzierung.....	29
3.1	Aufgaben und Ziele der Automatisierung	29
3.2	Automatisierung der Funktion Fertigung Rohbauteil	29
3.2.1	Tapeleger – Automatisierte Ablage von CFK-Rohmaterialien	29
3.2.1.1	Tapelegegerechte Bauteilkonstruktion	32
3.2.1.2	Tapelegeköpfe zukünftiger Bauart	34
3.2.2	AutoVac - Automatisierung der Schalenfertigung	37
3.2.2.1	Automatisierter Vakuumaufbau	37
3.2.3	Auto-RTM – Automatisierung der RTM-Fertigung	47
3.2.3.1	Konzept der Prozesskette	50
3.2.3.2	Automatisierung der einzelnen Herstellungsschritte	53
3.3	Automatisierung der Funktion Bearbeiten	71
3.3.1	Spannsystem	71
3.3.2	Bearbeitungsprozess	74
3.3.2.1	Geometrische Bearbeitung von CFK-Bauteilen	74
3.3.2.2	Oberflächenvorbereitung durch Laserstrahl	86

3.4	Automatisierung der Funktion Fördern und Speichern	93
3.4.1	Materialflusskonzept	93
3.4.2	Materialflusssysteme	94
4	Automatisierungsmöglichkeiten in der CFK-Montage zur Komplexitätsreduzierung.....	98
4.1	Aufgaben und Ziele der Automatisierung	98
4.1.1	Maßnahmen zur montagegerechten Produktgestaltung	99
4.1.2	Voraussetzungen für das Mechanisieren und Automatisieren von Montagearbeitsgängen	104
4.2	Automatisierung der Funktion Vormontage	108
4.2.1	Funktionsprinzip der Automatisierung	112
4.2.1.1	Konfiguration der Vorrichtung	116
4.2.1.2	Messen und Bohren des Bauteils	116
4.2.1.3	Setzen der Niete	117
4.3	Automatisierung der Funktion Strukturmontage	119
4.3.1	Funktionsprinzip der Automatisierung	119
4.3.1.1	Vormontage Vorder-/Hinterholm	120
4.3.1.2	Strukturmontage.....	121
4.3.1.3	Nietsetzstation.....	123
4.3.1.4	Ausrüststation	129
4.3.1.5	Endmontage und Teststation	130
4.4	Automatisierung der Funktion Ausrüstungsmontage	131
4.4.1	Taktfertigung.....	132
4.4.2	Flow-Line.....	133
4.4.3	Moving-Line.....	135
5	Lean Manufacturing Ansätze in der CFK-Fertigung.....	137
5.1	Schlüsselmerkmale einer schlanken Fertigung	139
5.1.1	5S – Ordnung und Sauberkeit	139
5.1.2	Standardisierung	140
5.1.2.1	Kontinuierliche Verbesserung.....	141
5.1.2.2	Standard-Arbeitsanweisung	141
5.1.2.3	Taktungstafel (Work Balance Board)	142
5.1.3	Visuelles Management	144
5.1.3.1	Andon-Prinzip	145
5.1.3.2	KPI-Prinzip	146
5.1.4	Total Productive Maintenance (TPM)	147
5.1.5	Problemlösung	150
5.1.6	Qualität.....	153
5.1.7	Just in Time.....	154

5.1.8	Kontinuierliche Verbesserung / Kaizen	156
5.1.9	Mensch im Mittelpunkt	158
5.1.10	Höchste Qualität, geringste Kosten	159
5.2	Bewertung und Einführung von Lean Manufacturing	159
6	Bewertung neuer Prozesse	162
6.1	Layoutplanung	163
6.2	Arbeitsplatzgestaltung	166
6.3	Ablaufsimulation	169
7	Zusammenfassung.....	174
8	Literaturverzeichnis.....	180
9	Register	182

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
2D:	zweidimensional
3D:	dreidimensional
A320:	Passagierflugzeug der Fa. Airbus
A340:	Passagierflugzeug der Fa. Airbus
A350:	Geplantes Passagierflugzeug der Fa. Airbus
A380:	Passagierflugzeug der Fa. Airbus
A400M :	Militärisches Transportflugzeug der Fa. Airbus
ARTIM:	All Resin Transfer In Mould
CAD:	Computer Aided Design
CAF:	Creep Age Forming
CATIA:	CAD-System
CFK:	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
CFRP:	Carbon Fibre Reinforced Plastic
CVD:	Chemical Vapour Deposition (Beschichtungsverfahren)
DIN:	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLR:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DSC:	Differential Scanning Calorimetry
FMEA:	Fehler-Möglichkeiten-und-Einfluss-Analyse
GFK:	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HSS:	Hochleistungsschnellarbeitsstahl
KPI:	Key Performance Indicator
KVP:	Kontinuierliche Verbesserungsprozess
LCM :	Liquid Composite Moulding
MAG:	Multi-Axial-Gelege
NC:	Numerical Controlled
NDT:	Non Destructive Testing (nicht-zerstörendes Prüfverfahren)
OEE:	Overall Equipment Effectiveness
PKD:	Polykristalliner Diamant
Prepreg:	Pre-impregnated (vorimprägnierte Faserhalbzeuge)
RTM:	Resin Transfer Moulding
SLW:	Seitenleitwerk
SPC:	Statistical Process Control
TPM:	Total Productive Maintenance
VHM:	Vollhartmetall

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Dimension
σ	Freiwinkel	° (Grad)
α_f	Spanwinkel	° (Grad)
A	Brennfleckgröße	cm ²
F	Pulsfrequenz	Hz
I	Energiedichte; Brennfleckintensität	J/cm ²
P _M	mittlere Laserleistung	W
v _c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v _f	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min

1 Einleitung

Aus ökonomischen und ökologischen Gründen ist der Leichtbau in der Luftverkehrstechnik vor dem Hintergrund eines durchschnittlichen Wachstums von 5% pro Jahr unumgänglich /18/. Das Leichtbaupotenzial von Faserverbundwerkstoffen insbesondere von CFK (Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe) übertrifft das Potenzial der metallischen Werkstoffe klar, sowohl hinsichtlich der Festigkeit und Steifigkeit als auch des Energieaufnahmevermögens, der Dämpfung und Schwingfestigkeit.

Der derzeit dennoch eingeschränkte Einsatz von CFK in der Verkehrstechnik ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die CFK- Produktionsverfahren einen heute noch hohen manuellen Arbeitsanteil aufweisen.

Die technologische Herausforderung besteht somit darin, rationelle, kostengünstige und automatisierbare Produktionsverfahren für Hochleistungsfaserverbunde, also Lamine hoher Qualität mit gezielter Orientierung von Lang- / Endlosfasern, zu entwickeln.

Die nachfolgende Arbeit beinhaltet somit unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten eine Analyse der CFK-Prozesse mit dem Ziel einen Beitrag zur Stabilität und Automatisierung dieser Prozesse aufzuzeigen.

Aufgrund der Komplexität und Breite der anwendbaren Technologien, Fertigungsprozesse und Verfahren liegt der Schwerpunkt auf den Produktionsprozessen, die sich in der industriellen Anwendung hinsichtlich Prozessstabilität und Automatisierung durchsetzen können. Der dargestellte Ansatz basiert auf den Produktionsprozessen „Teilefertigung“ und „Montage“, beinhaltet aber auch die absichernden Prozesse wie Organisationsformen, Lean-Manufacturing-Ansätze und neue Prozesse wie z.B. die digitale Fabrikplanung.

Die aufgezeigten Potenziale basieren auf Erkenntnissen aus Forschungsprojekten, ersten industriellen Anwendungen sowie wissenschaftlichen Weiterentwicklungen bestehender Prozesse im industriellen Umfeld.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Herstellung von großen (bis 3 m x 20 m), leicht gekrümmten Laminat-Faserverbundbauteilen von der Einzelteilerfertigung bis zur Montage sowie einem Ausblick in die RTM-Teilerfertigung (Resin Transfer Moulding) unter dem Gesichtspunkt der Realisierung hoher Stückzahlen für z.B. die Luftfahrt- und Automobilindustrie.

Der Autor möchte mit dieser Arbeit bestehende Lücken in den CFK-Prozessen aufzeigen und diese durch neue Forschungen, daraus resultierende Erkenntnisse und Ableitungen für die technische Realisierung so weiterentwickeln, dass stabile Produktionsverfahren entstehen, die eine wirtschaftliche und abgesicherte Herstellung von CFK-Komponenten ermöglichen.

2 CFK im Produktionsprozess

Produktionsprozesse in der CFK-Fertigung folgen im Grundsatz den allgemeinen Industrieprozessen wie

- der Produktionsorganisation,
- der Produktionstechnologie,
- dem Produktionssystem.

Bei der Analyse dieser Prozesse, aber im Besonderen bei der Umsetzung in den industriellen Ablauf sind allerdings große Abweichungen zu den bekannten metallischen Produktionsabläufen erkennbar.

Insbesondere die Komplexität der Rohteilherstellung unterscheidet sich maßgeblich von metallischen Strukturen. Die Herstellung von metallischen Bauteilen, wie z.B. der Blechumformung oder der Zerspanung, basiert auf einem in der Regel gelieferten, ausgereiften Ausgangsprodukt, dem Blech, Coil¹, Platte oder Schmiedeteil.

Die erforderliche Wertschöpfung in dem produzierenden Betrieb beschränkt sich somit auf die Geometrieformgebung, wie z.B. dem Streckziehen, Pressen, Kanten, Rollen oder der Zerspanung einschließlich der entsprechenden Wärmebehandlungsvorgänge.

Die CFK-Teilefertigung folgt ganz anderen Prozessabläufen und damit Produktionsrisiken. Der Produktionsprozess basiert auf 5 Grundparametern, die sich wechselseitig beeinflussen können:

- Werkstoffparameter,
- Verarbeitungsparameter,
- Vorrichtungskonzept mit Formgebung,
- Härtingsprozess,
- Bearbeitung.

Bei Abweichungen z.B. in der inneren Qualität oder in der Geometrie sind Analysen aufgrund der mehrdimensionalen Abhängigkeiten sehr komplex und können deshalb nur mit systematischen Ansätzen erfolgreich analysiert werden.

Stabile CFK-Prozesse sind somit die Ausgangsvoraussetzung für einen beherrschbaren Fertigungsprozess zu vereinbarten Kosten.

¹ Coil (englisch für Spule): Bezeichnung für ein aufgewickeltes Metallband

2.1 Organisationstypen

Prozessstabilität beginnt im Prozessmanagement bzw. in der Produktionsorganisation. Zur Erreichung der Produktionsziele

- Termin,
- Qualität und
- Kosten

sind in der Fertigung und besonders in der CFK-Fertigung zwei mögliche Organisationstypen umsetzbar:

- produktbezogene Organisation,
- prozessbezogene Organisation oder die
- Synthese aus beiden Organisationsformen.

Die Herstellung eines CFK-Bauteils durchläuft im Prepreg²-Prozess in der Regel sieben Teilprozessschritte:

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Geometriegebung / Tapeleger³, • Autoklav⁴, • NDT⁵, • Mechanische Bearbeitung, • Oberflächenschutz, • Strukturmontage, • Ausrüstungsmontage. | <div style="font-size: 4em; vertical-align: middle; padding: 0 10px;">}</div> <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;">Einzelteilmontage</div> |
| | <div style="font-size: 4em; vertical-align: middle; padding: 0 10px;">}</div> <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;">Montage</div> |

Sortiert nach der Wertschöpfung entstehen zwei in der Industrie übliche Grundformen:

- Einzelteilmontage und
- Montage.

Im Rahmen der Einzelteilmontage sind die Randbedingungen für den geometriebildenden Prozess ebenfalls von Bedeutung.

Das Handling der Tapematerialien muss bis zum Einpacken für den Autoklavprozess abschließend im Klimabereich stattfinden.

² Prepreg sind bereits mit einem Harz/Härter-Gemisch vorimprägnierte Fasern bzw. Fasergebilde /11/

³ Tapeleger sind Maschinen, die mit Harz vorimprägnierte Faserhalbzeuge (Prepregs) automatisch in Formenwerkzeuge einlegen.

⁴ Ein Autoklav ist ein gasdicht verschließbarer Druckbehälter. In der CFK-Produktion werden Autoklaven genutzt, um einzelne Laminatschichten miteinander zu verpressen und in einem chemischen Reaktionsprozess das Harzmaterial auszuhärten..

⁵ NDT steht für englischsprachig Non-Destructive-Testing und bezeichnet die Qualitätskontrolle mit Hilfe einer nicht zerstörenden Qualitätsprüfung. Im Falle von CFK-Bauteilen wird eine solche Prüfung zumeist mit Ultraschall durchgeführt

Neben den Toleranzvorgaben (Abbildung 2-1) werden auch spezielle Randbedingungen für die Luftreinheit gefordert und beinhalten somit eine räumliche Trennung zwischen den Fertigungsprozessen. Das erfordert einen hohen Einsatz von entsprechender Anlagentechnik und Energie.

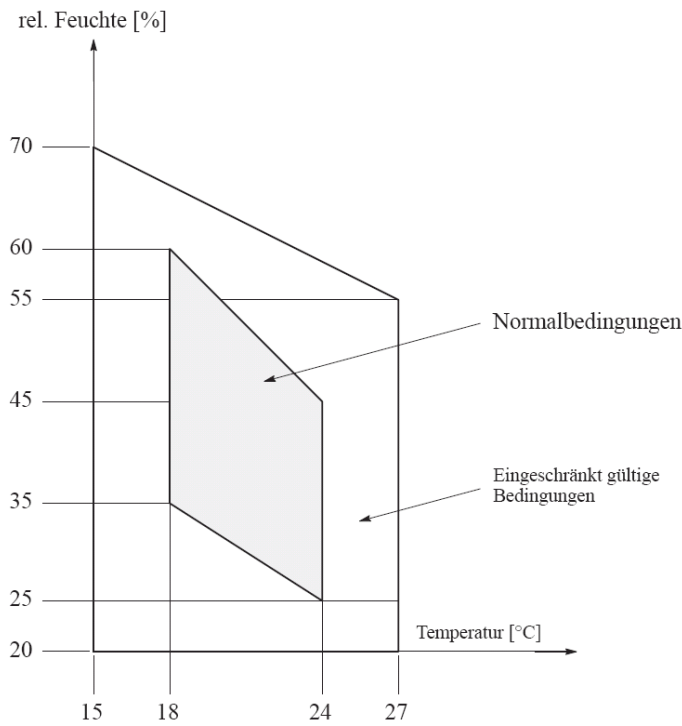


Abbildung 2-1: Zulässige klimatische Bedingungen für Arbeitsräume

2.1.1 Produktbezogene Organisation

Der Grundgedanke der produktbezogenen Organisation basiert auf der organisatorischen Zusammenfassung aller wertschöpfenden Prozesselemente (Value Stream⁶) in einer Hand oder Organisation.

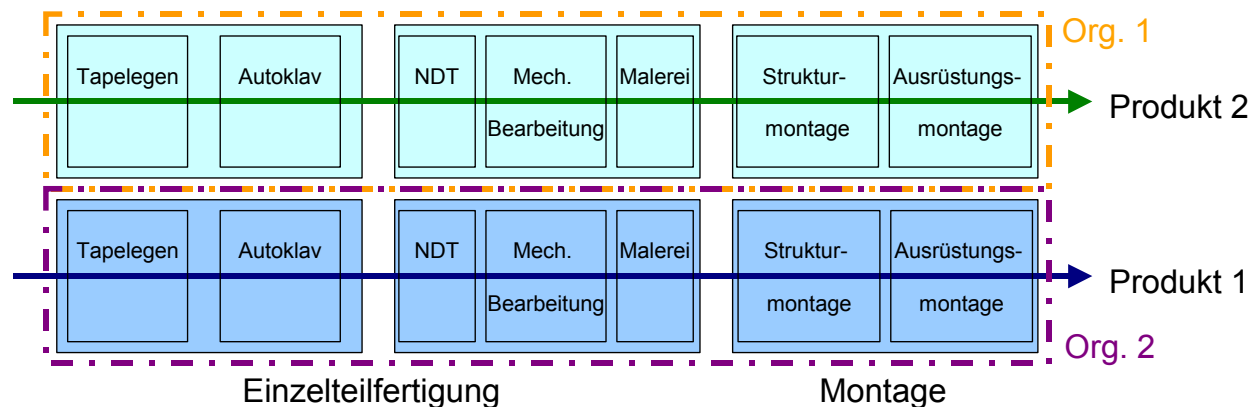


Abbildung 2-2: Produktbezogene Organisation

⁶ Value Stream bezeichnet alle wertschöpfenden Schritte einer Prozesskette

Gemäß Abbildung 2-2 werden alle sieben Teilprozessschritte in einer Organisation zusammengefasst.

Eine Untergliederung in drei Teilbereiche

- Rohteilherstellung,
- Rohteilbearbeitung und
- Montage

bildet eine sinnvolle Untergliederung, um die Beherrschbarkeit in der Personalstärke und Fehler/Prozesssicherheit sicher abdecken zu können.

Eine Führungsspanne auf Abteilungs- bzw. Unitebene sollte eine Zahl von 200 bis 300 Mitarbeitern nicht überschreiten.

Hierbei wird jedoch unterstellt, dass zur direkten fachlichen und operativen Führung ein Unterbau von ca. 50-70 Mitarbeitern pro Prozess und Schicht erforderlich wird. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Führungskräfte eine starke fachliche Qualifikation vorweisen können.

Abbildung 2-3 zeigt die mögliche Führungsstruktur einer produktbezogenen Organisation.

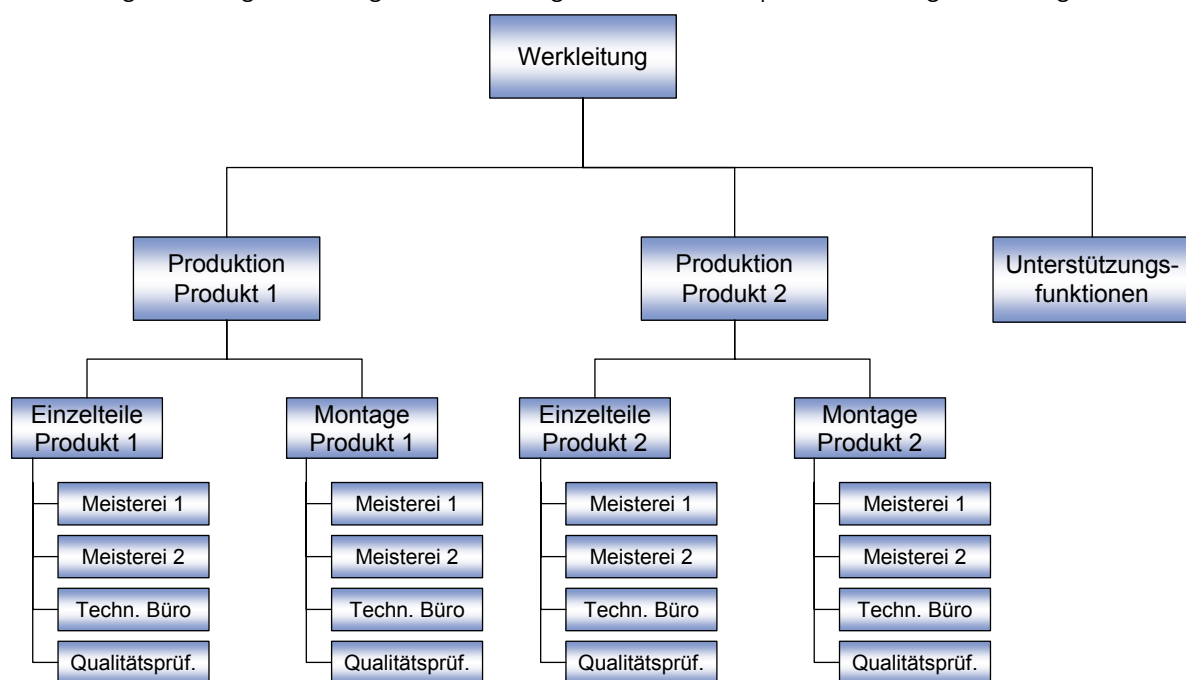


Abbildung 2-3: Führungsstruktur einer produktbezogenen Organisation

Aus Sicht der Prozessstabilität ergeben sich für das Produkt, den Bereich, das Werk folgende Vorteile:

- Die Wertschöpfung vom Rohteil bis zur Montagekomponente liegt in einer Organisationseinheit.
- Daraus abgeleitet ist die Kosten- und Terminverantwortung für das Produkt ebenfalls dieser Organisationseinheit zugeordnet.

- Unter dem Aspekt „Schlanke Fertigung“ („Lean Manufacturing“)⁷ /2/, d.h. Bestandsreduzierung, kann durch eine maximale Flexibilisierung der Mitarbeiter über die Produktlinien eine optimale Kapazitätssteuerung erreicht werden. Die Umsetzung des Pull-Systems⁸ von der Montage zurück zur Einzelteillfertigung ist dadurch optimal umsetzbar.
- Der Qualitätssicherungsprozess kann aufgrund der Gesamtverantwortung sinnvoll den Prozessschritten zugeordnet werden, Doppelaktivitäten werden verhindert. Die Einführung bzw. Beschreibung entsprechender „Quality Gates“⁹ sichert den Wertschöpfungsübergang ab und sorgt für stabile Prozessabläufe.
- In der produktbezogenen Organisation kommt es gegenüber dem Kunden, dem Abnehmer oder den Behörden zu der gewünschten klaren Schnittstelle, so dass ein einzelner Verantwortlicher für das Produkt existiert.

2.1.2 Prozessbezogene Organisation

Das kennzeichnende Merkmal einer prozessbezogenen Organisation (Abbildung 2-4) liegt in der Fokussierung auf dem Prozess, d.h. das Produkt bzw. die Produktwertschöpfung wird dem Prozess oder der Prozesswertschöpfung untergeordnet.

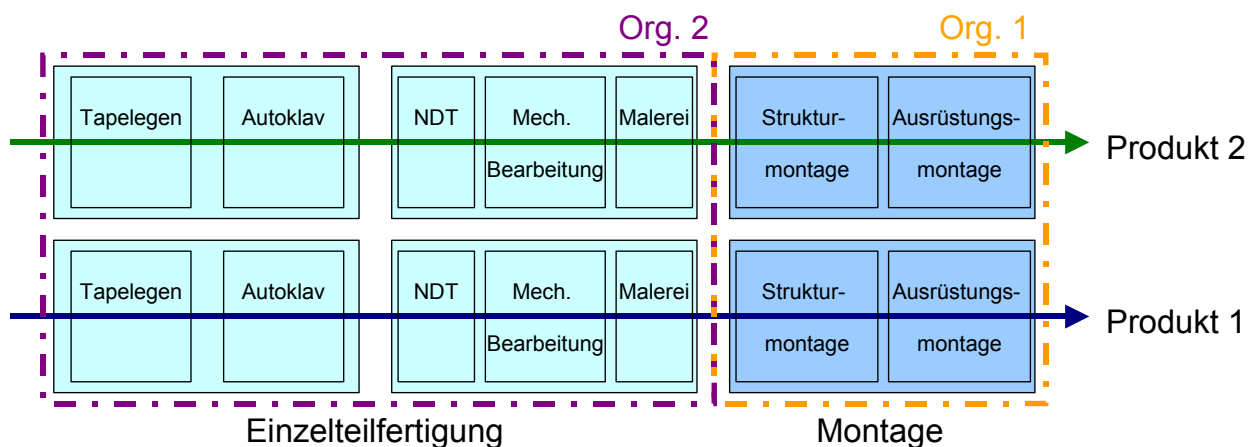


Abbildung 2-4: Prozessbezogene Organisation

⁷ Lean Manufacturing umfasst eine Vielzahl an Methoden und Werkzeugen, die den herkömmlichen Ablauf von Fertigung und Montage revolutionär verändern. Es zielt darauf ab, Verschwendung entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu vermeiden. Zu den geläufigen Methoden zählen u.a. Kanban, Pull-System und TPM.

⁸ Beim Pull-System wird auf allen Fertigungsstufen eine Produktion auf Abruf in direkter Abhängigkeit vom Kundenverbrauch angestrebt, damit Materialbestände reduziert und hohe Termintreue erreicht werden können.

⁹ Quality Gates sind klar definierte Kontrollinstanzen an denen der Fertigungsprozess hinsichtlich Qualität und Termintreue überprüft wird. Erst nach Abschluss der Kontrollen und der Erzielung fehlerfreier Ergebnisse wird die Produktion in den nächsten Arbeitsschritt überführt.

Entsprechend den Teilprozessschritten werden die ersten fünf Schritte in der Funktion Einzelteilerfertigung sowie die Schritte Strukturmontage und Ausrüstungsmontage in der Funktion Montage zusammengefasst.

Unter Berücksichtigung der Führungsspanne von 200-300 Mitarbeitern je Teilfunktion, z.B. Einzelteilerfertigung, und einer Untergliederung mit starker fachlicher Orientierung von 50-70 Mitarbeitern je Prozess und Schicht ist eine Organisationsabbildung gemäß Abbildung 2-5 in der Praxis umsetzbar.

Für die Prozessstabilität ergeben sich aus dieser Vorgehensweise folgende positive Ansätze:

- Durch die horizontale Vernetzung gleicher Prozesse, z.B. der Zusammenfassung aller Tapelegeranlagen, kann bei optimaler Synthese der Prozessabweichungen die Prozessstabilität optimiert werden.
- Das Fachwissen wächst aufgrund der Breite/Duplizierung schneller, der Know-How Transfer ist intensiver und die Fehlerwiederholbarkeit ist geringer.
- Unterschiedliche Produkte, speziell neue Produkte, durchlaufen ausgereifte und stabile Prozesse.
- Dies wirkt sich auch auf den Kapazitätsabgleich zwischen den Anlagen und damit auf eine verbesserte Kostensteuerung und einen optimalen Stundenlohn aus.

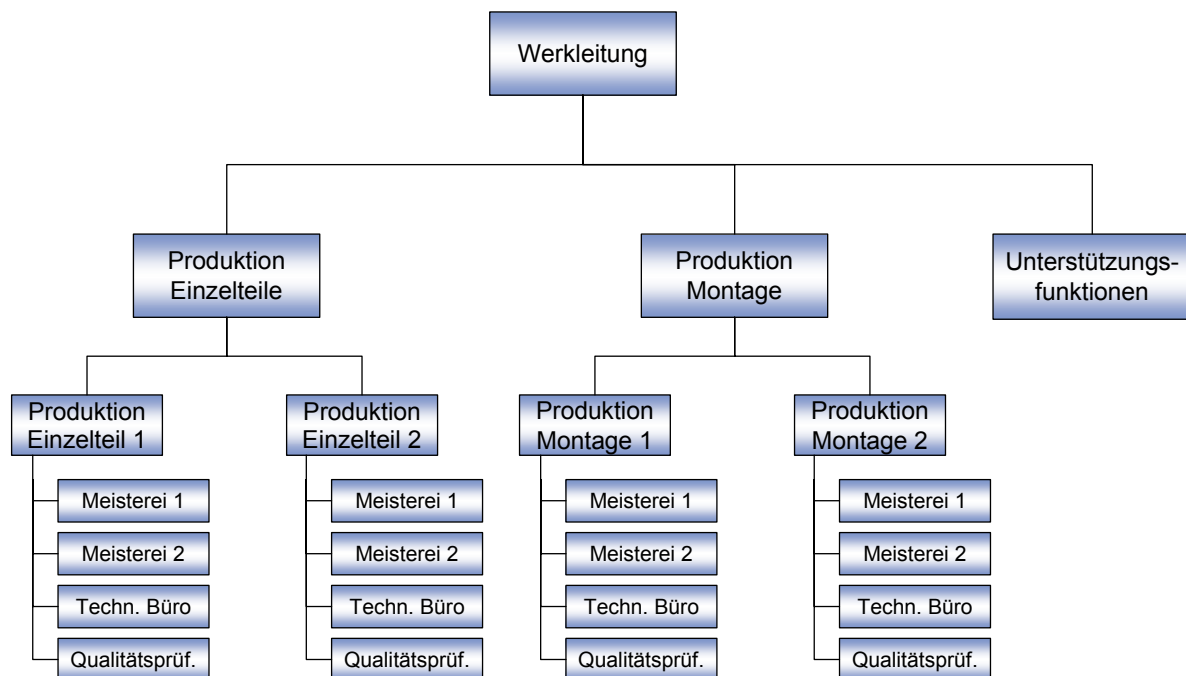


Abbildung 2-5: Führungsstruktur einer prozessbezogenen Organisation

2.1.3 Synthese der Organisationsformen

Ausgehend von einer detaillierten Analyse beider Organisationsformen (siehe Abbildung 2-2 – Abbildung 2-5) mit den entsprechenden Vor- und Nachteilen der produkt- bzw. prozessbezogenen Organisation, steht das Ziel durch die Synthese beider Strukturen ein organisatorisches Optimum zu erreichen (Tabelle 2-1).

Vorteile der Prozessstabilität	Produkt-bezogene Organisation	Prozess-bezogene Organisation	Synthese-prozess
• Wertschöpfungskette in einer organisatorischen Verantwortung	★	☒	★
• Kosten-/Terminüberwachung in einer organisatorischen Verantwortung	★	☒	★
• Optimale Nutzung der „Lean Manufacturing“-Ansätze (Pull-System)	★	☒	★
• Ganzheitlicher Qualitätssicherungsprozess	★	☒	★
• Klare Schnittstelle zum Kunden (ein Verantwortlicher für das Produkt)	★	☒	★
• Durch die technologische Vernetzung (Fehlervermeidung) wird die Prozessstabilität optimiert	☒	★	★
• Intensiver Know-How-Transfer reduziert die Fehlerwiederholbarkeit	☒	★	★
• Ausgereifte, stabile Prozesse für Neuprodukte	☒	★	★
• Optimaler Kosten- und Kapazitätsabgleich zwischen den Anlagen	☒	★	★

★ trifft zu ☒ trifft nicht zu

Tabelle 2-1: Analyse der Organisationsformen

Das Layout einer solchen Optimierung ist in Abbildung 2-6 dargestellt. In der Praxis findet dieser Ansatz seine Bestätigung und stärkt die Organisation zusätzlich durch ein Kunden- / Lieferantenverhältnis innerhalb der zwei Produktionslinien.

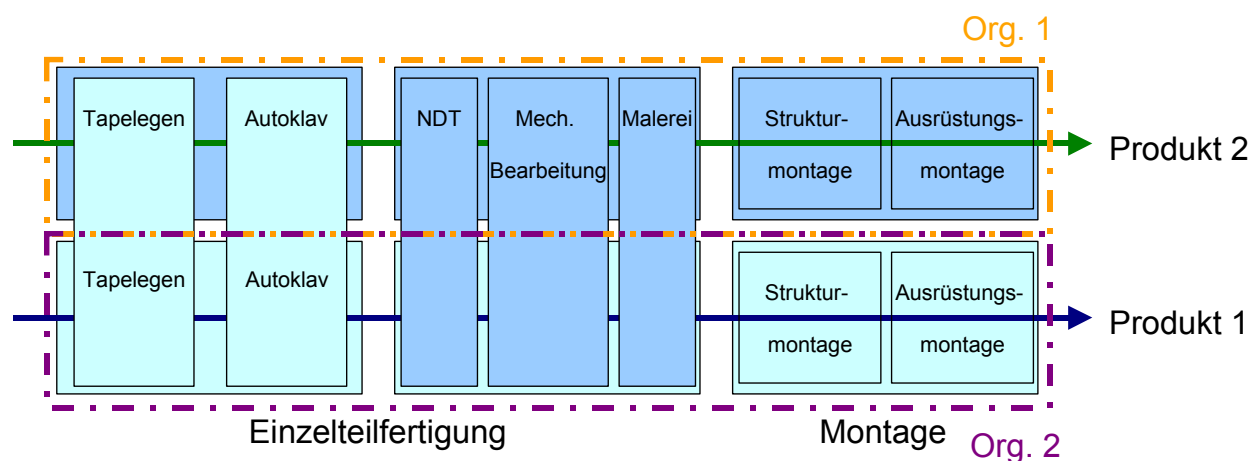


Abbildung 2-6: Optimierung der Organisationsform

In der Zusammenfassung liegen die Besonderheiten und damit die Gründe für eine Differenzierung in der Prozessstabilität.

Liegt der Schwerpunkt der Produktion auf einem bereits ausgereiften, stabilen Produktionssystem, ist der Einsatz der produktbezogenen Organisation durch die interaktive Verknüpfung zwischen Montage und Teilefertigung die optimale Organisationsform.

Befindet sich die Fertigung in der Anlaufphase der Produktion, d.h. sie ist geprägt von der Prozess- oder Fertigungsreife, dann ist die prozessbezogene Organisationsform der effizientere Weg.

Die Synthese beider Organisationsformen unterstützt die wechselseitige Wirkung beider Randbedingungen. In der Regel wechseln die Produktlaufzeiten, so dass sowohl Serienprodukte (Produkt 1) als auch Anlaufprodukte (Produkt 2) parallel produziert werden müssen. Mit dem Synthesemodell lassen sich gemäß der Analyse alle Randbedingungen prozessoptimiert umsetzen.

2.2 Teilefertigung

Die Teilefertigung ist in der Regel Bestandteil der Eigen-Wertschöpfungskette von CFK-Produktionsprozessen bzw. Lieferant für die Strukturmontage. Die Grundlage der Eigenfertigung basiert insbesondere in der CFK-Produktion auf folgenden Ansätzen:

- Technologieentwicklung und damit Prozesseigner (Patentanmeldung),
- Referenzfertigung zur Technologiebestimmung und Kostentransparenz,
- Qualitäts- und Lieferabsicherung der Montage,
- Core- / Non-Core¹⁰-Entscheidungen basierend auf der eingesetzten Technologie oder Kostensituation,
- Entscheidung aus dem Benchmarkprozess¹¹ bzw. Stückkostenvergleich,
- eingesetzte Logistik insbesondere in Abhängigkeit der Bauteilgröße oder des Bauteilgewichts,
- erforderliche Investitionsbereitschaft in Verbindung mit der Nutzung von Risk-Share-Partnern¹².

Die Prüfung der Ansätze und die jeweilige Entscheidung ist grundsätzlich abhängig von der entsprechenden Firmenstruktur und Firmenpolitik. Allgemeingültige Angaben können nur aus Benchmarkergebnissen abgeleitet werden. Ist die Eigenfertigung auf Großkomponen-

¹⁰ Core / Non-Core bezeichnet Bereiche der Produktion, die zum Kerngeschäft (Core) bzw. nicht zum Kerngeschäft (Non-Core) des Unternehmens gehören

¹¹ Der Begriff Benchmark (= Maßstab) bezeichnet ein formalisiertes Konzept, um Verbesserungsmöglichkeiten durch den Vergleich von Leistungsmerkmalen mehrerer vergleichbarer Objekte, Prozesse oder Programme zu finden.

¹² Risk-Share-Partner sind Firmen, die sich durch den Einsatz von eigenem Kapital am finanziellen Risiko eines Neuprogramms beteiligen.

ten ausgerichtet, so ergibt sich aus dem industriellen Benchmark folgendes Bild (Abbildung 2-7):

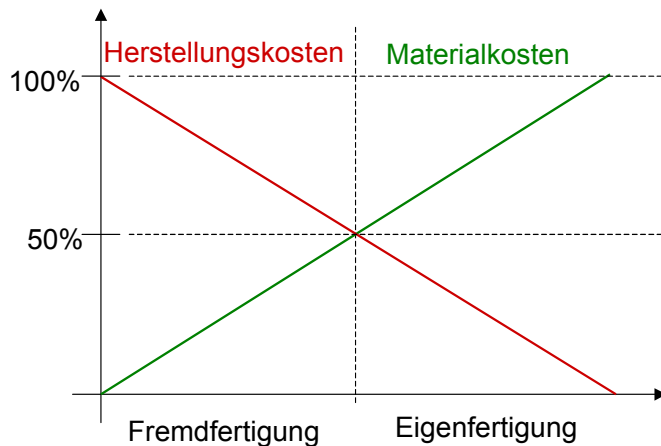


Abbildung 2-7: Eigen- und Fremdfertigung in Abhängigkeit der Herstellungs- und Materialkosten

Aufgrund umfangreicher Marktanalysen gilt für Industrieunternehmen mit einem durchschnittlichen Werksstundensatz (Basis 2007 70-90 €/h) ein Entscheidungspunkt von 50% Materialkosten und 50% Herstellungskosten in der Eigenfertigung.

Wird in der Eigenkalkulation ein Verhältnis von 70% Materialkosten und 30% Herstellungskosten ermittelt, so sollte ohne Berücksichtigung anderer Parameter / Ansätze die Entscheidung auf Eigenfertigung gesetzt werden. Grundsätzlich müssen allerdings alle Entscheidungen vom jeweiligen Produktions- und Prozessrisiko getragen werden.

2.2.1 Aufgaben der Teilefertigung

Ist gemäß Kapitel 2.2 die Entscheidung für die Eigenfertigung getroffen worden, so gilt es im Weiteren die einzelnen Prozesse (siehe Abbildung 2-8) hinsichtlich ihrer Komplexität zu analysieren.

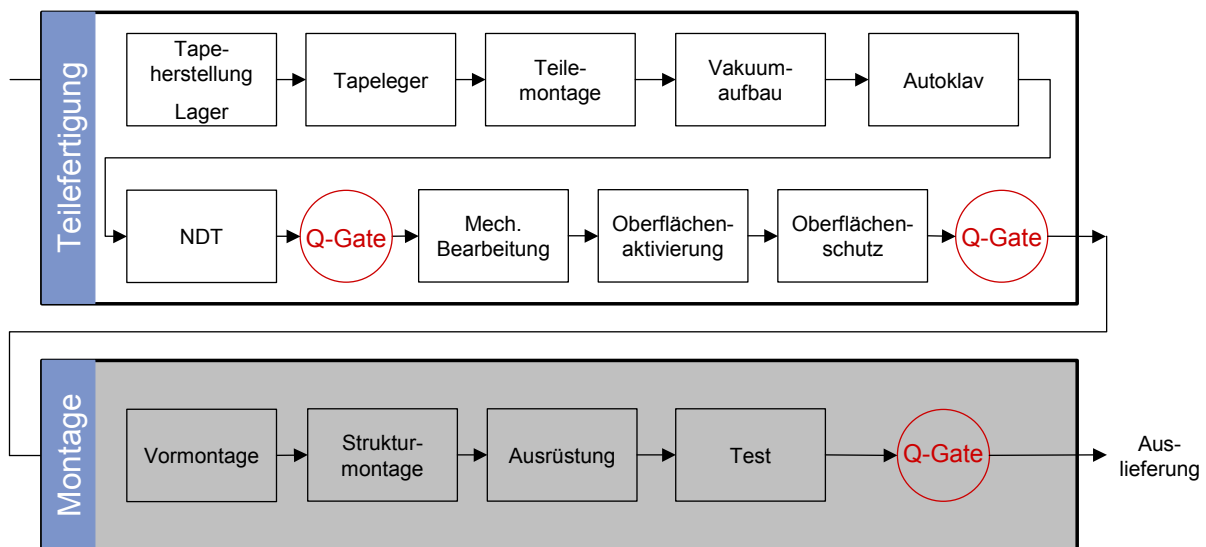


Abbildung 2-8: Aufgaben der Teilefertigung

2.2.2 Komplexität in manuellen Einzelteilfertigungsprozessen am Beispiel einer Airbus A400M¹³-Flügelschale

Die Herstellung von CFK-Einzelteilen mit unidirektionalem Tapelege folgt in der Regel dem in Abbildung 2-9 dargestellten Produktionsablauf:

- Schritt 1: Legen der Außenhaut mit einem automatischen Tapeleger mit 300 mm Tapebreite direkt im 3D-Verfahren in die Vorrichtung
- Schritt 2: Aufsetzen, montieren und ausrichten der Verstärkungsprofile und Doppler auf die CFK-Haut
- Schritt 3: Vakuumaufbau und aushärten im Autoklav
- Schritt 4: Bauteil entformen, geometrische sowie innere Qualitätsprüfung nach dem NDT-Prinzip
- Schritt 5: Geometrische Bearbeitung des Rohteils
- Schritt 6: Oberflächenaufbereitung einschließlich Oberflächenschutz

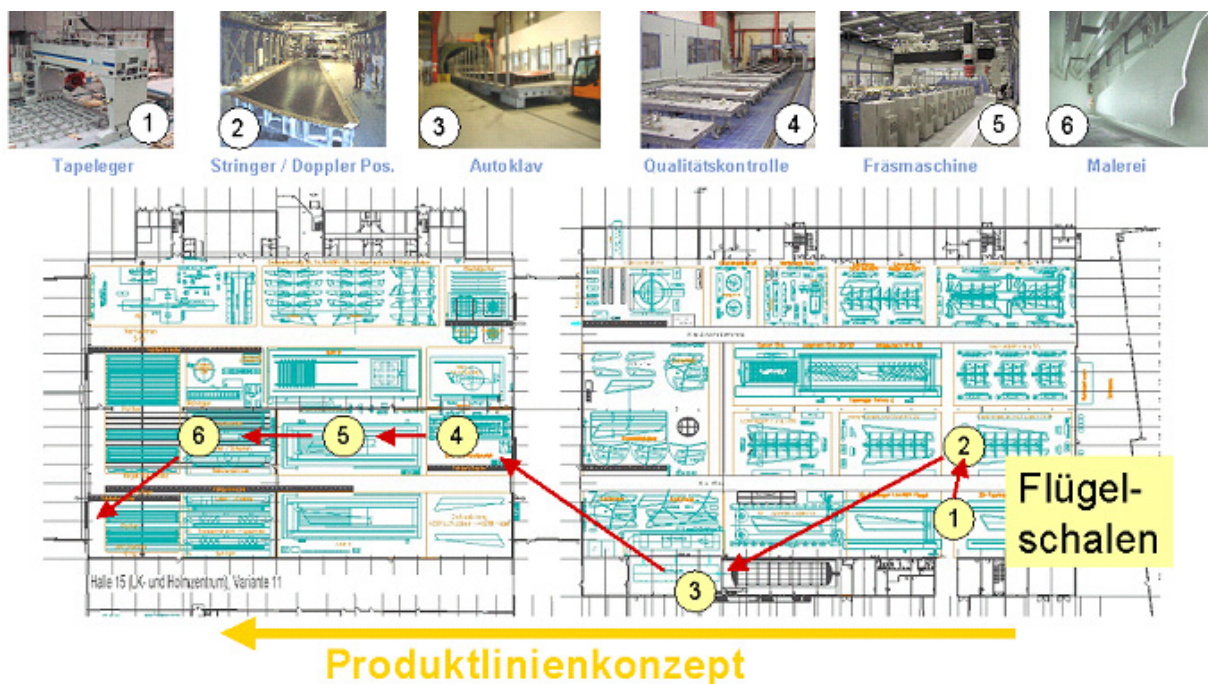


Abbildung 2-9: Fertigungsschritte einer A400M-Flügelschale aus CFK

Im Vergleich gelten für die Produktion einer metallischen Flügelschale folgende Prozessparameter:

- Schritt 1: Mechanische Bearbeitung der Aluminium-Platte im ebenen Zustand

¹³ Die A400M ist ein militärisches Transportflugzeug, das von Airbus Military entwickelt wird, um bei verschiedenen europäischen Luftwaffen den veralteten Bestand an Transportflugzeugen zu ersetzen.

- Schritt 2: Umformung im Ofen bei bis zu 220°C als Kriechumformung (creep age-forming (CAF))
- Schritt 3: Oberflächenschutz

In Abhängigkeit der Bauteilgröße, Komplexität und Gewicht erfolgt die Wertschöpfung für ein CFK-Bauteil mit 900 kg Eigengewicht in folgenden Schritten und Durchlaufzeiten (Abbildung 2-10):

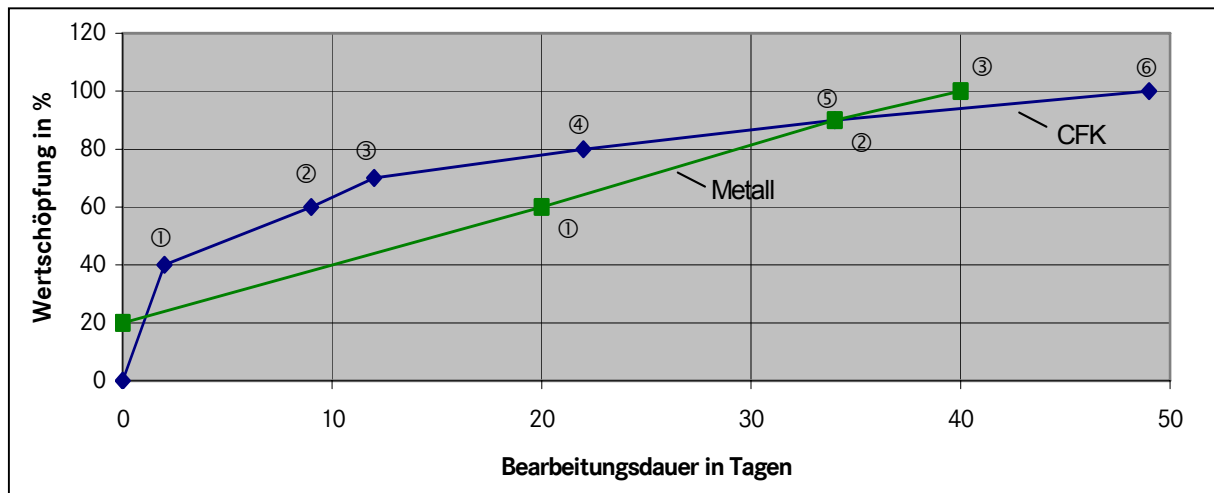


Abbildung 2-10: Vergleich der Wertschöpfungsprozesse am Beispiel einer A400M-Flügelschale (CFK vs. Metall)

Der nichtlineare Wertschöpfungsprozess beinhaltet im Rahmen der knapp 50 Tage Durchlaufzeit Produktionsrisiken, die zum Totalverlust des Bauteils führen können.

Um dieses zu verhindern, wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

Zur Stabilisierung der Prozesse und zur Absicherung der Lieferfähigkeit eignet sich im Besonderen eine Risikoanalyse unter Einbindung aller Fachverantwortlichen, die den jeweiligen Prozessschritt durchführen bzw. durchführen lassen.

Die Analyse der Prozessschritte sollte nach einfachen und klaren Regeln erfolgen, z.B.:

Welcher Prozessschritt kann zum Ausschuss des Bauteils führen?

Unter Berücksichtigung dieser Strategie ergibt sich dann folgender Ablauf:

1. Schritt (siehe Abbildung 2-11): Alle verantwortlichen Prozesseigner zerlegen den Produktionsprozess in seine Grundprozesse.
Am Beispiel einer Flügelschale ergeben sich zwölf Prozessschritte, wovon nur vier (grün) als nicht kritisch eingestuft werden können.

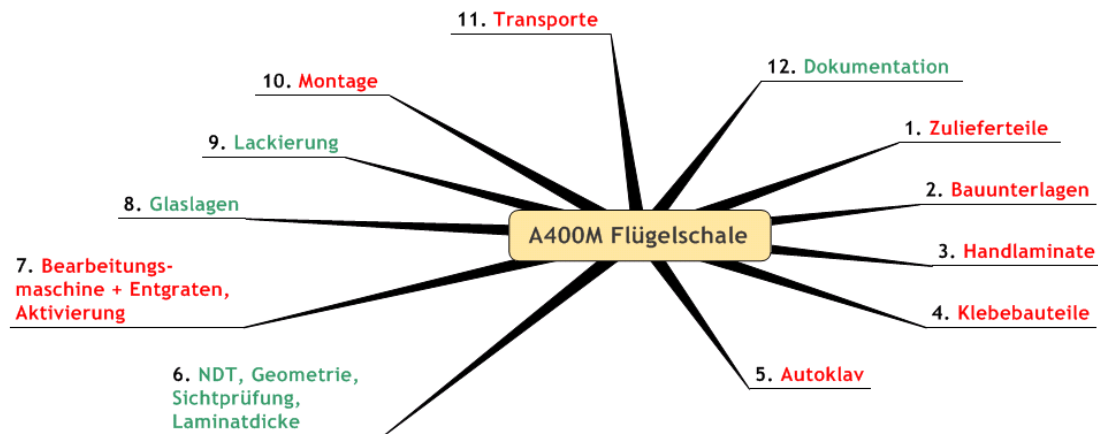


Abbildung 2-11: Risikoanalyse einzelner Prozessschritte

2. Schritt: Den identifizierten Risikoprozessen werden Prozesseigner zugeordnet, die wiederum in kleinen Workshops mit den beteiligten Mitarbeitern den Hauptprozess weiter aufgliedern (Abbildung 2-12).

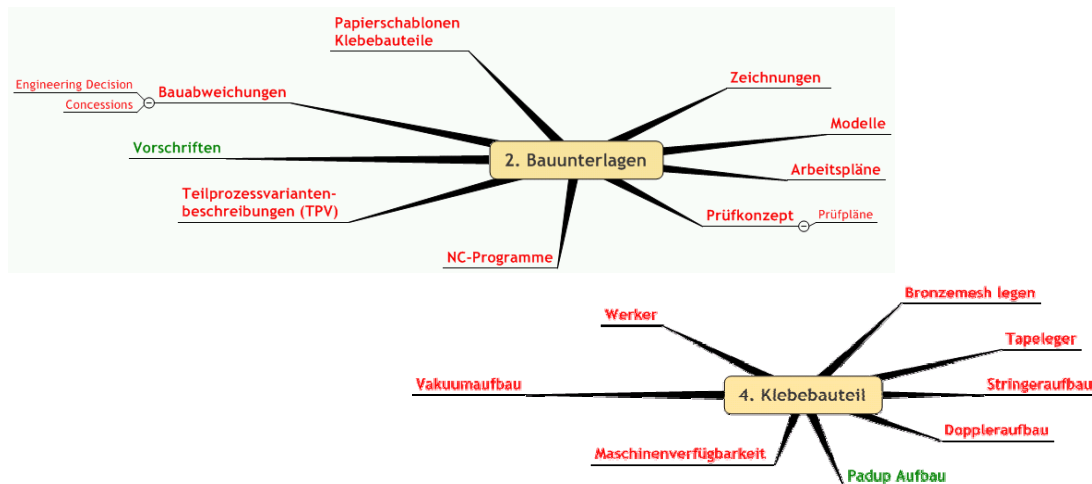


Abbildung 2-12: Risikoanalyse von Teilprozessen

3. Schritt: Alle Risiken werden in einem Maßnahmenkatalog (siehe Tabelle 2-2) spezifiziert nach Risiko, Maßnahme, Aktionshalter, Erledigungszeitpunkt und Status erfasst.
- Zur Überprüfung der Maßnahmen eignen sich Prozessbesprechungen sowie eine Kontrolle des Erfüllungsfortschritts vor Ort.














7. Mechanische Bearbeitung - Umrissfräsen						
Datum	Von	Betreff: UMRISFRÄSEN	Maßnahme	Wer ist verantwortlich	Bis wann	Status
12.2.	XYZ	aktuelle Werkzeugliste	aktuelle Werkzeugliste in Papierform / elektronisch im Tool Data Management-System (TDM) geplant	ZYX	28.02.	
12.2.	XYZ	aktuelle Zeichnung	aktuelle Zeichnungen in Papierform / elektronisch im TDM	ZYX	28.02.	
12.2.	XYZ	Werkzeuglängen in Steuerung eingeben	2 malige Bestätigung des Bedieners in der Steuerung notwendig	ZYX	28.02.	
12.2.	XYZ	Ausfransungen am Fräsereraustritt	Anschliff der Werkzeuge vor Bearbeitung kontrollieren	ZYX	28.02.	
12.2.	XYZ	Ausfransungen am Fräseraustritt	Vorschub anpassen / Vorbohrung einbringen --> TMB --> Programmierer	ZYX	28.02.	
12.2.	XYZ	Ausfransungen an Fräskante	Vorschub / Drehzahl / Werkzeug ändern --> TMB --> Programmierer / Werkzeugtechnologie	ZYX	28.02.	
12.2.	XYZ	Prozeßkontrolle	Programmtest nach Vorgabe der Programmierer bei neuen Prog.	ZYX	28.02.	
12.2.	XYZ	Lage NC Programm prüfen	Einbringen einer kleinen Fräsnut und Kontrolle über Stichmaß	ZYX	1.3.	
12.2.	XYZ	laden eines falschen Programms	es ist nur das jeweils gültige Programm im DNC vorhanden, Abgleich der Programmnummer und des Programmstandes auf Programmliste, Laufkarte und DNC	ZYX	28.02.	
Problem identifiziert  Maßnahme identifiziert  Maßnahme umgesetzt  Maßnahme verifiziert 						

Tabelle 2-2: Maßnahmenkatalog

Nach Abschluss der Risikoanalyse lassen sich für den manuellen Einzelteilprozess folgende kritische und komplexe Prozesse identifizieren:

- Einhaltung der Randbedingungen wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Vorbereitung des Werkzeuges,
- abgeschlossene 3D-Simulation des Tapelegeprozesses,
- optimaler Vakuumaufbau unter Berücksichtigung der Luftentsorgung und dem Schrumpfungsprozess der Vakuumfolie,
- einheitliches Referenzsystem von der Bauteilherstellung, mech. Bearbeitung und Montage des Bauteils,
- abgeschlossene 3D-Simulation des mechanischen Bearbeitungsprozesses, einschließlich Werkzeugbestimmung,
- der Bauteilverwendung zugeordnetes Prüfkonzert einschließlich Dokumentation der Fehler sowie Abweichungsmerkmale.

Zur Stabilisierung der identifizierten Teilefertigungsprozesse bestehen zwei unterschiedliche bzw. sich ergänzende Vorgehensweisen: zum Einen eine analytische Prozessbeschreibung mit entsprechenden manuellen Prozessabsicherungsmaßnahmen, wie z.B.

- Gegenseitige Prüfung (4-Augenprinzip),
- Prozessdokumentation,

sowie zum Anderen die Automatisierung, die in Kapitel 3 näher beschrieben wird.

2.3 Montage

Den allgemeinen Industrieprozessen folgend ist auch die Montage nach interner und externer Wertschöpfung zu analysieren.

In Anlehnung an die Teilefertigung sind grundsätzlich folgende Parameter zu prüfen:

- Core- / Non-Core-Entscheidung hinsichtlich der Montagetiefe, z.B. Struktur- oder Untergruppenmontage,
- Entscheidung aus dem Benchmarkprozess bzw. Stückkostenvergleich,
- Technologieentwicklung und damit Prozesseigner (Patentanmeldung),
- Referenzfertigung zur Technologiebestimmung und Kostentransparenz.

Aufgrund der vielfältigen Montagearten und -strukturen gibt es keine allgemeingültigen Benchmarkergebnisse.

Die Entscheidung für die Eigen- oder Fremdfertigung muss jeweils am Projekt im Rahmen einer Ausschreibung getroffen werden.

Neben der Kostenoptimierung kann bzw. sollte eine Fremdvergabe gleichzeitig auch zu einer Prozessstabilisierung in der Eigenfertigung führen. Hierzu müssen allerdings entsprechende Audits beim Lieferanten durchgeführt werden.

2.3.1 Aufgaben der Montage

Die Aufgabe der Montage beinhaltet sowohl das Zusammenführen der Einzelteile aus der Eigen- und Fremdfertigung als auch die Integration der internen und externen Untergruppen und Vormontagen.

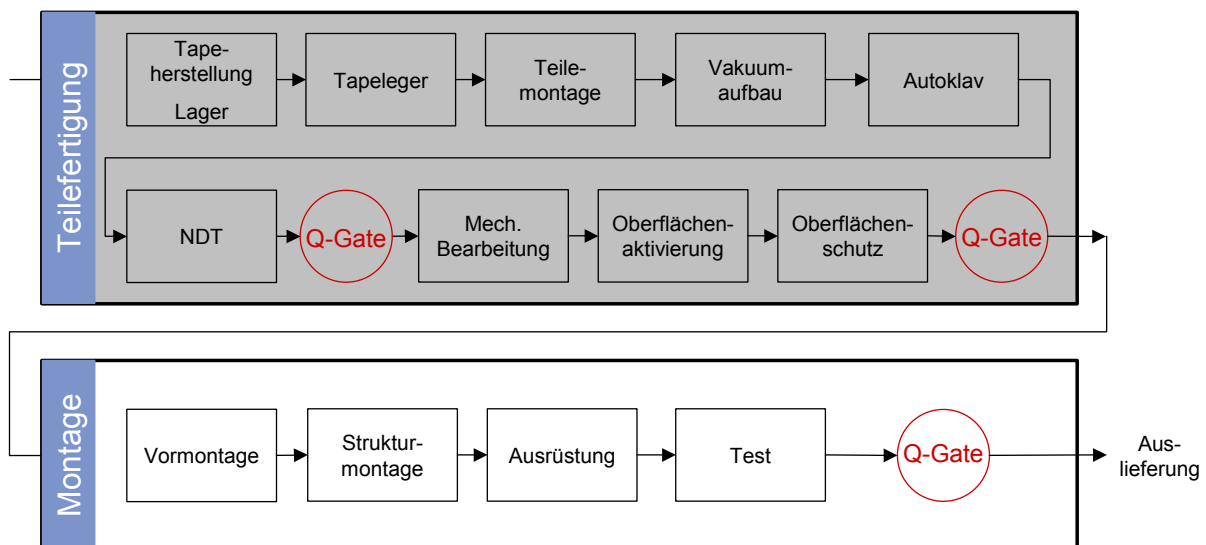


Abbildung 2-13: Aufgaben der Montage

Die in der Montage angewendeten Prozessschritte basieren gemäß Abbildung 2-13 auf Funktionen wie:

- Vormontage,
- Strukturmontage,
- Ausrüstung und
- Test.

Die dabei auftretenden Komplexitäten sollen im nachfolgenden Kapitel näher erläutert werden.

2.3.2 Komplexität in Montageprozessen

Grundsätzlich sind die angewendeten Fügeprozesse und Montagetätigkeiten bis auf wenige Ausnahmen (z.B. Schweißverfahren) zwischen Metall- und CFK-Strukturen vergleichbar. Die Besonderheiten und damit Risiken liegen

- im Material und in den Werkstoffeigenschaften,
- in den Bauteiltoleranzen und
- in den Verbindungselementen.

2.3.2.1 Material- und Werkstoffeigenschaften

Um den Anforderungen der Konstruktion gerecht zu werden, werden folgende Anforderungen an die Bohrungen gestellt (siehe auch Abbildung 2-14):

- enge Toleranzen der Bohrungsdurchmesser in Abhängigkeit des Nietes und der geforderten Passung,
- keine Delamination¹⁴ am Bohrungsein- und -austritt,
- Einhaltung der geforderten Form- und Lagetoleranzen von Bohrung und Senkung zueinander, auch bei gekrümmten Bauteiloberflächen.

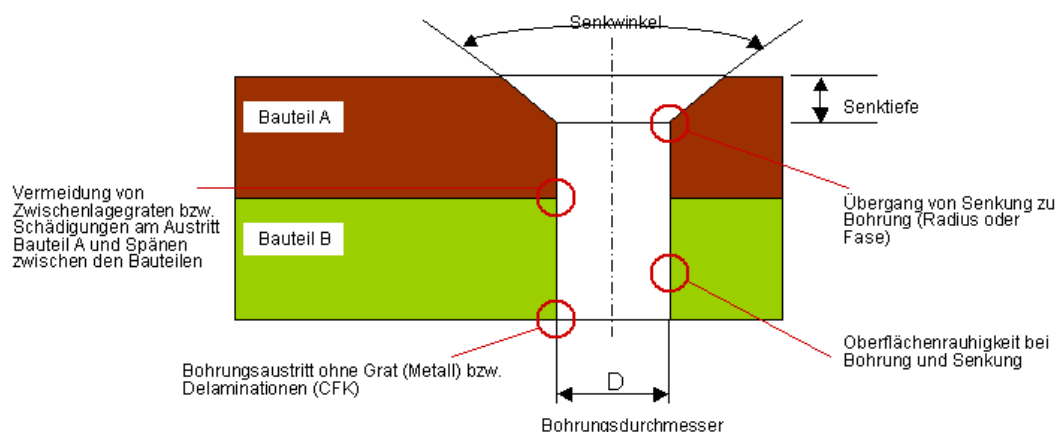


Abbildung 2-14: Anforderungen an Bohrungen

¹⁴ Delamination bezeichnet das Ablösen von Schichten in Werkstoffverbunden.

- Zur Erreichung der oben genannten Anforderungen werden Bohrungen im Regelfall mit folgenden Parametern gebohrt:
- Trockenbearbeitung
- $v_c = 50-70 \text{ m/min}$ (manuell) bzw. $v_c = 70-100 \text{ m/min}$ (masch.);
 $v_f = 300-600 \text{ mm/min}$
- Schneidteilgeometrie: $\sigma = 85^\circ$, $\alpha_f = 10^\circ/20^\circ$ oder Sichelbohrer
- Standmengen: 100-150 Bohrungen (VHM¹⁵); 500-800 Bohrungen (PKD¹⁶)

Spezielle Aufmerksamkeit erfordert das Bohren von Mischpaketen (Abbildung 2-15). Ein Mischpaket ist ein Bauteilverbund mehrerer verschiedener Materialien, zum Beispiel CFK und Aluminium.

Bei der Bohrreihenfolge von CFK zu Aluminium können die Metallspäne das CFK aufreißen und beschädigen. Dies geschieht, wenn der zum Bohrungseintritt hin erfolgende Spanabfluss erschwert oder behindert wird. Dieses Problem taucht in der Regel nur bei dickerem Material auf.

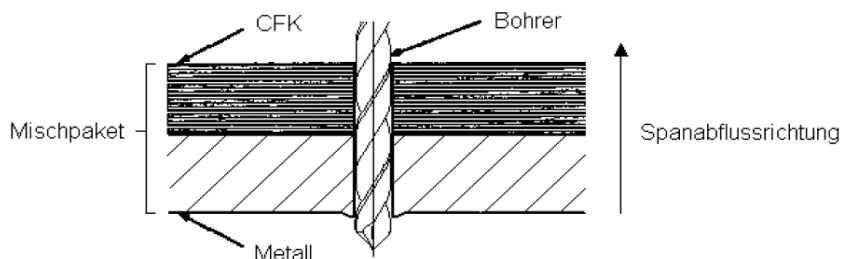


Abbildung 2-15: Bohren von Mischpaketen

Das Problem kann gelöst werden, indem der Bohrvorgang unterbrochen, der Bohrer zum Entfernen der Späne aus der Bohrung gezogen und wieder eingeführt wird.

Zur weiteren Lösung des Problems ist ein Bohrer zu wählen, dessen Spannten groß genug sind, damit die Späne leichter durch die Spannten abfließen.

Beim Bohren von Mischpaketen mit der Bohrreihenfolge von CFK zu Metall sind vorzugsweise Bohrer mit größerem Spitzenwinkel (135° oder 160°) zu wählen. Damit wird eine Gratbildung am Bohrungsaustritt verhindert.

2.3.2.2 Bauteiltoleranzen

Bei der Montage eventuell auftretende Spaltmaße an den Verbindungsstellen müssen bestimmt und ausgeglichen (geschimmt) werden. CFK-Bauteile werden grundsätzlich mit Tole-

¹⁵ Vollhartmetall-Bohrer

¹⁶ Poly-Kristalliner-Diamant-Bohrer

ranzen gefertigt; geringe Abweichungen (Schrumpfen) können nicht vermieden werden. In der Montage treffen erstmals alle mit ihren Toleranzen gefertigten Einzelteile aufeinander. Trotz der entstandenen Differenzen müssen die Bauteile zu einer Gesamtkomponente zusammengefügt werden. Daraus ergibt sich, dass die entstandenen Abweichungen (Spalte) auszugleichen sind.

Zur Spaltmaßbestimmung zwischen den Bauteilen werden Messvorrichtungen verwendet. Liegen unzulässige (zu große) Spalte zwischen den zu verbindenden Bauteilen vor, müssen diese mit Shim¹⁷ ausgebessert werden (siehe auch Abbildung 2-16) /3/:

- Bis zu einem Spaltmaß von 0,3 mm muss nicht geshimmt werden.
- Spalte von einschließlich 0,3 bis 1,5 mm werden mit Flüssigshim ausgearbeitet.
- Spalte über einschließlich 1,5 bis 2,5 mm werden mit Festshim und Flüssigshim ausgeglichen.

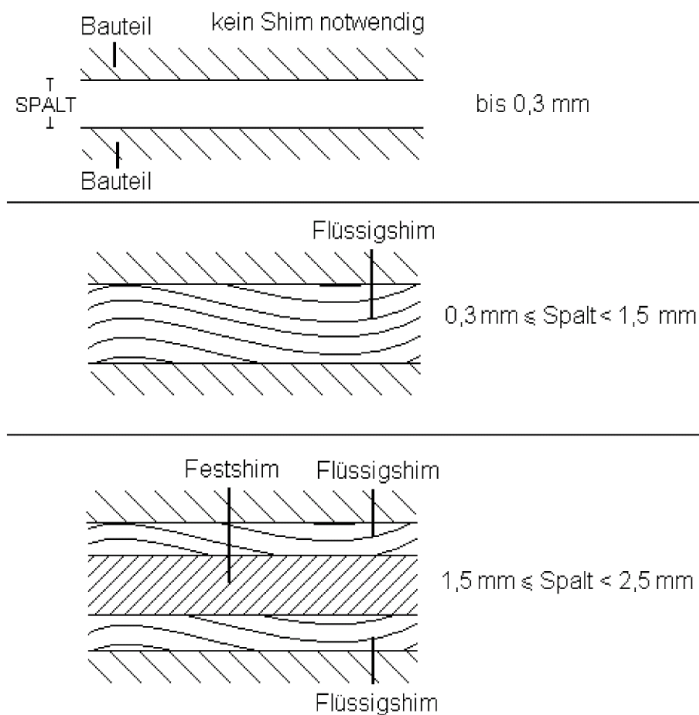


Abbildung 2-16: Notwendigkeit von Shim in Abhängigkeit der Spaltgröße /3/

Flüssigshim ist ein pastöser Werkstoff, der aus Harz und einem Härter besteht. In der Montage werden verschiedene Shimsorten verwendet, die sich im Mischungsverhältnis von Harz und Härter unterscheiden. Durch Erwärmung des Shims lassen sich die Prozesszeiten verkürzen, da er schneller aushärtet.

Festshim sind vorgefertigte Platten aus CFK oder GFK¹⁸. Der Werkstoff der Festshimbeilage variiert in Abhängigkeit der zu verbindenden Bauteile. Beim homogenen Verbund von CFK

¹⁷ Shim bezeichnet ein Material (flüssig oder fest) zum Füllen von Abständen zwischen einzelnen Bauteilen.

mit CFK werden als Festshim ebenfalls CFK-Platten verwendet. Der Bauteilverbund CFK/Metall erfordert als Festshimwerkstoff GFK.

2.3.2.3 Verbindungselemente

Die in der Montage verwendeten Nietsysteme werden hinsichtlich der zu übertragenden Kräfte, der Zugänglichkeit und Automatisierungsfähigkeit gewählt /3/:

1. Passniet (Lockbolt)

Passniete (Lockbolts) sind zweiteilige Verbindungselemente. Sie bestehen aus einem Passbolzen und einem Schließring ohne Innengewinde. Der Passbolzen verfügt am unteren Schaftende über eine Sollbruchstelle und zwei Schaftabschnitte mit Gewinden, den Quetschbereich und den Zugteil (Abbildung 2-17).

Die Nietverbindung wird hergestellt, indem der Passbolzen in das Bohrloch eingeführt und der Schließring gequetscht wird. Das Gewinde im Quetschbereich schneidet sich in den Schließring ein. Der Passniet wird abgezogen, das Zugteil bricht an der Sollbruchstelle ab.

Ein automatisiertes Setzen der Passniete ist mit Hilfe von Robotern, die auf beiden Seiten des zu vernietenden Bauteils positioniert sind, möglich.

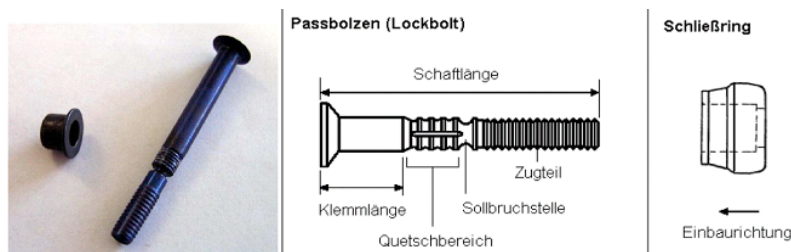


Abbildung 2-17: Passniet /3/

Abbildung 2-18 zeigt das Setzverfahren einer Lockbolt-Verbindung.

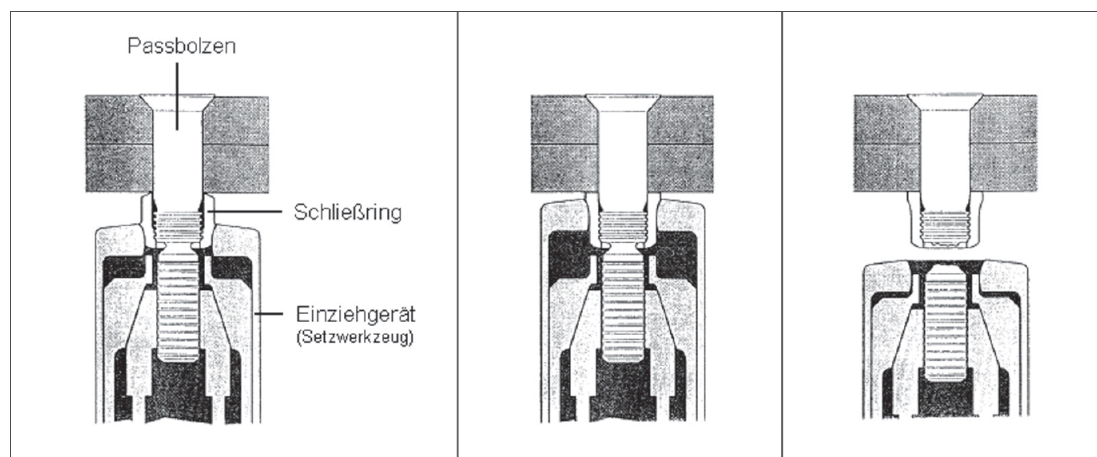


Abbildung 2-18: Setzverfahren einer Lockbolt-Verbindung /3/

¹⁸ Glasfaserverstärkter Kunststoff, kurz GFK, ist ein Faser-Kunststoff-Verbund aus einem Kunststoff (z. B. Polyesterharz, Epoxidharz oder Polyamid) und Glasfasern.

2. Schraubpassniet (Hi-Lok)

Schraubpassniete (Hi-Loks) sind zweiteilige Verbindungselemente. Sie bestehen aus einem Schraubpassbolzen sowie einem Schließring mit Innengewinde und Sollbruchstelle. Die Schraubpassbolzen haben einen zylindrischen Bolzenschaft, an dessen unterem Ende ein Gewinde angebracht ist (Abbildung 2-19).

Auf der Stirnfläche des Bolzenschaftes befindet sich ein Innensechskant (Inbus). Über diesen Innensechskant kann der Bolzen beim Aufschrauben des Schließringes mit einem Innensechskantschlüssel gegen Verdrehen gesichert werden. Dies ist meist nur dann erforderlich, wenn die Bohrung nicht der geforderten Bohrungsqualität (Presspassung) entspricht, sondern zu groß ausfällt (Spielpassung).

Die Nietverbindung mit Hi-Loks wird hergestellt, indem der Schraubpassbolzen in das Bohrloch eingeführt und der Schließring mit einem Setzwerkzeug aufgeschraubt wird. Sobald ein definiertes Anzugmoment überschritten wird, schert der Schließring ab und die Nietverbindung ist hergestellt.

Hi-Loks und Lockbolts unterscheiden sich im Wesentlichen darin, wie der Schließring montiert wird. Bei Lockbolts wird der Schließring aufgesteckt und gequetscht, bei Hi-Loks wird er aufgeschraubt. Dies bedingt, dass Hi-Loks derzeit nicht automatisch gesetzt werden können. Abbildung 2-20 zeigt den Setzvorgang eines Hi-Loks. Dabei verhindert die Auffädung des Schließringes den automatischen Prozess.

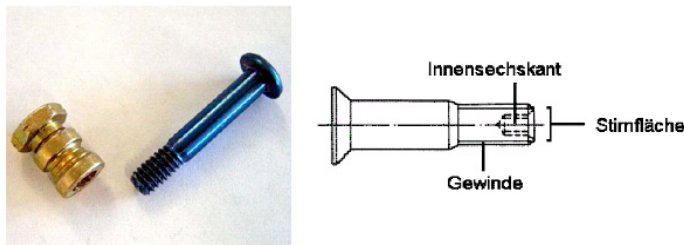


Abbildung 2-19: Schraubpassniet (Hi-Lok) /3/

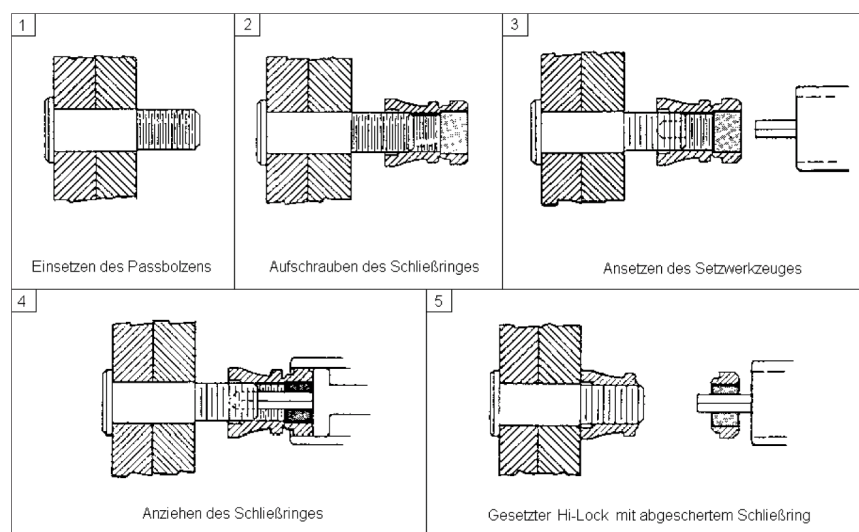


Abbildung 2-20: Setzvorgang eines Hi-Loks

3. Blindniet

Blindniete sind Verbindungselemente aus drei Bestandteilen, die alle in ein Element integriert sind. Sie bestehen aus Niethülse, Nietdorn und Sicherungsring. Blindniete bringen einen großen Automatisierungsvorteil mit sich, da das Setzen nur den Zugang von einer Seite der zu verbindenden Bauteile erfordert. Blindniete sind Niete mit Schaftaufweitung. (siehe auch Abbildung 2-21)

Für das Setzen der Blindniete wird ein Ziehgerät verwendet. Der Niet wird gesetzt, indem der Nietschaft verformt wird. Nach dem Auslösen des Ziehgerätes wird der Nietdorn in das Ziehgerät gezogen. Die Niethülse verformt sich und bildet den Schließkopf. Der Sicherungsring wird in die Kerbe des Nietdornes gedrückt und verriegelt so den Nietdorn mit der Niethülse. Beim Erreichen der entsprechenden Zugkraft reißt der Nietdorn an der Sollbruchstelle ab.

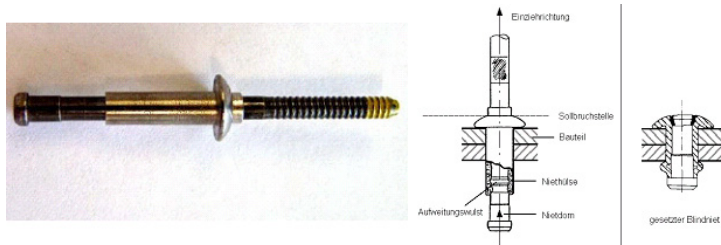


Abbildung 2-21: Blindniet (ABS) /3/

Bei der geforderten Passung für die Nietverbindungen handelt es sich meist um Presspassungen (Lockbolts und Hi-Loks). Durch Presspassungen wird garantiert, dass bei Temperaturabfall die Bauteile durch die Nietverbindungen formschlüssig miteinander verbunden bleiben. Bei Voll- und Blindnieten wird aufgrund der Lochleibung beziehungsweise Schaftaufweitung eine Spielpassung gefordert (siehe hierzu Abbildung 2-22 und Abbildung 2-23).

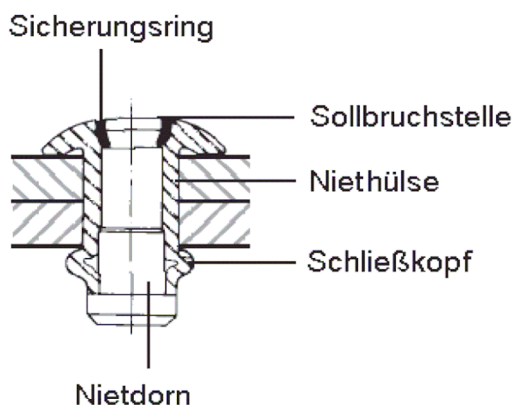


Abbildung 2-22: Gesetzter Blindniet /3/

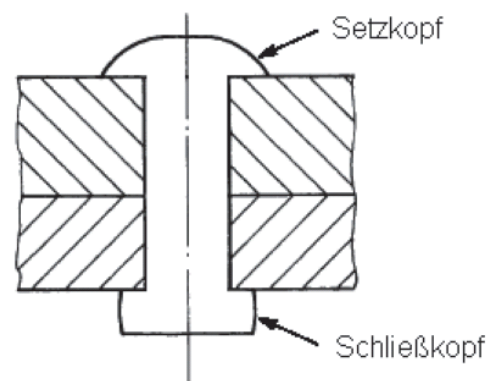


Abbildung 2-23: Gesetzter Vollniet /3/

Durch das Verpressen bzw. Stauchen des Schaftes wird der Nietschaft aufgeweitet und füllt damit die Nietbohrung aus.

2.3.3 Vormontage

In der CFK-Fertigung bzw. Montage hat das Konstruktionsprinzip der Gesamtkomponente erheblichen Einfluss auf die Montagefolge und damit auf die Komplexität des Gesamtsystems.

Zur Entzerrung und Auflösung dieser Komplexität eignet sich im Besonderen eine Trennung der Montagefolge in Komponenten- und Prozessschritte. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Vormontage.

In der Vormontage lassen sich unabhängig vom Hauptmontageprozess hauptzeitparallel Struktur- oder Einbaukomponenten fertigen (siehe Abbildung 2-24).



Abbildung 2-24: Vorderholm- (links) und Hinterholmvormontage (rechts) eines A380-Seitenleitwerks

Die erforderlichen Komponenten können dann „just in time“¹⁹ der Strukturmontage zugeführt werden.

Damit werden folgende Vorteile generiert:

- Die Komplexität der Montage wird in einzelne überschaubare Einzelmontagen und –schritte zerlegt.
- Störungen wirken sich nicht automatisch auf den Kernmontageprozess aus.
- Die Lieferfähigkeit der Gesamtkomponente wird durch die Trennung der Komplexitäten optimal abgesichert.
- Durch die Eigen- und Fremdfertigung können sowohl im Core- als auch im Non-Core-Bereich Kostenvorteile erzielt werden.
- Komponentenmontagen sind in der Regel ergonomisch ausgezeichnet zu gestalten.
- Komponenten / Vormontagen müssen nicht zwangsläufig dem Arbeitszeitmodell der Haupt- / Strukturmontage folgen.

¹⁹ Der Begriff „Just in Time“ [engl.: termingenau, gerade rechtzeitig] bezeichnet in der Produktionslogistik ein Konzept zur Materialbereitstellung, das auf die Verkleinerung der Zwischenlager und eine allgemeine Rationalisierung des Produktionsprozesses abzielt.

- Dies wiederum ermöglicht es, auch leistungsgeminderte Mitarbeiter in den Montageprozess zu integrieren.

Vormontagen sind insbesondere wirkungsvoll, wenn ein hoher Anteil der Ausstattungsmontage in die Komponente integriert werden kann. Dies gilt hauptsächlich für Hydraulik und Elektrik, ein abschließender Funktionstest sichert den Prozess und die weitere Montage ab. Folgt die Konstruktion diesen Montageregeln, so entsteht ein schlanker Montageprozess (Lean Manufacturing) mit einfacheren, ergonomisch günstigeren Montageschritten und damit erhöhter Prozessstabilität und in Verbindung damit eine abgesicherte Lieferfähigkeit.

2.3.4 Strukturmontage

Die Strukturmontage ist in den meisten Industrien, wie z.B.

- Automobilindustrie (Karosse),
- Schiffbau (Schiffsrumpf),
- Flugzeugbau (Rumpf)

und im Besonderen in der CFK-Fertigung die Kernkompetenz des Unternehmens.

Die Struktur beinhaltet die Grundfunktionen der Lieferkomponente für den Kunden.

Speziell im Flugzeugbau findet man in flächigen Strukturen (wie z.B. Flügel oder Seitenleitwerk) eine immer wiederkehrende Grundstruktur, die Torsionsbox.

Die Torsionsbox (siehe Abbildung 2-25) mit den Elementen

- Schalen,
- Rippen und
- Holme

überträgt die Lasten und Kräfte in den Rumpf. Dies gilt für den Flügel, das Höhenleitwerk und das Seitenleitwerk.

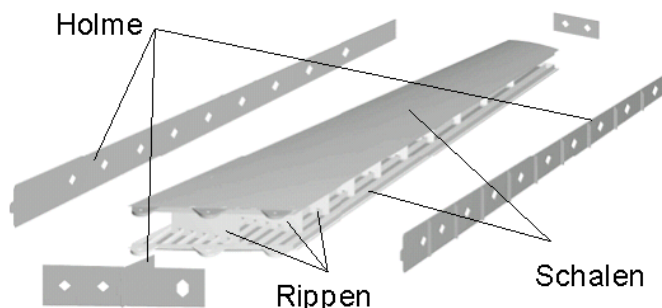


Abbildung 2-25: Aufbau einer Torsionsbox am Beispiel eines Seitenleitwerks /3/

Die Komplexität in der Strukturmontage ist geprägt durch die Elemente

- Toleranzen,

- Dimensionen und
- geringe Stückzahlen.

Die Toleranzvorgaben oder auch Toleranzsysteme unterscheiden sich erheblich von metallischen Konstruktionen (Faktor 3 bis 7). Deshalb ist eine direkte Übertragung metallischer Montagekonzepte oder Toleranzen (Abbildung 2-26) auf CFK-Konstruktionen nicht möglich.

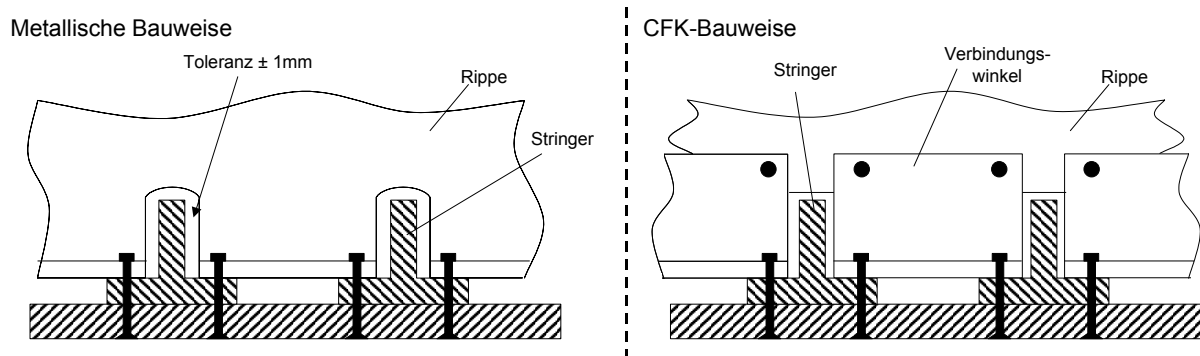


Abbildung 2-26: Montagekonzeptunterschiede zwischen metallischen und CFK-Strukturen

Die nachfolgenden Bilder zeigen drei typische Toleranzproblemfelder:

1. Schrumpfung der Matrix

Bei der Reaktion der Harzmatrix im Autoklav kommt es zu einer Volumenschwindung des Materials von bis zu 3%. Dies verursacht eine Profilverschiebung von mehreren Millimetern bei Großbauteilen.

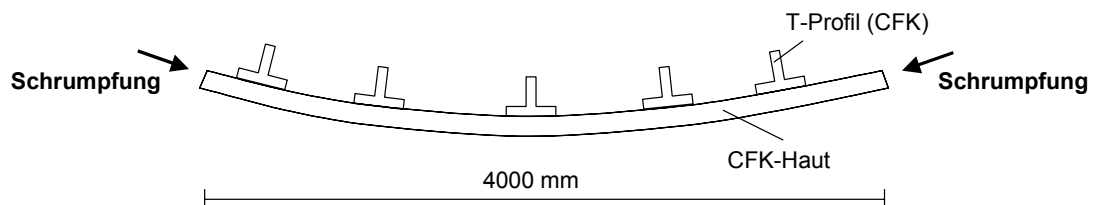


Abbildung 2-27: Schrumpfungsverhalten am Beispiel einer A400M-Flügelschale

2. Verschiebung von Profilen

Verursacht durch den Vakuumaufbau und die Nicht-Verwendung von Druckstücken zwischen den einzelnen T-Profilen entstehen bei der Verwendung von vorausgehärteten Versteifungselementen auf nasser CFK-Haut Harz- / Faserwellen, die wiederum zu einem Verschieben der Profile führen; auch hier sind Abweichungen von mehreren Millimetern möglich (Abbildung 2-28 und Abbildung 2-29).

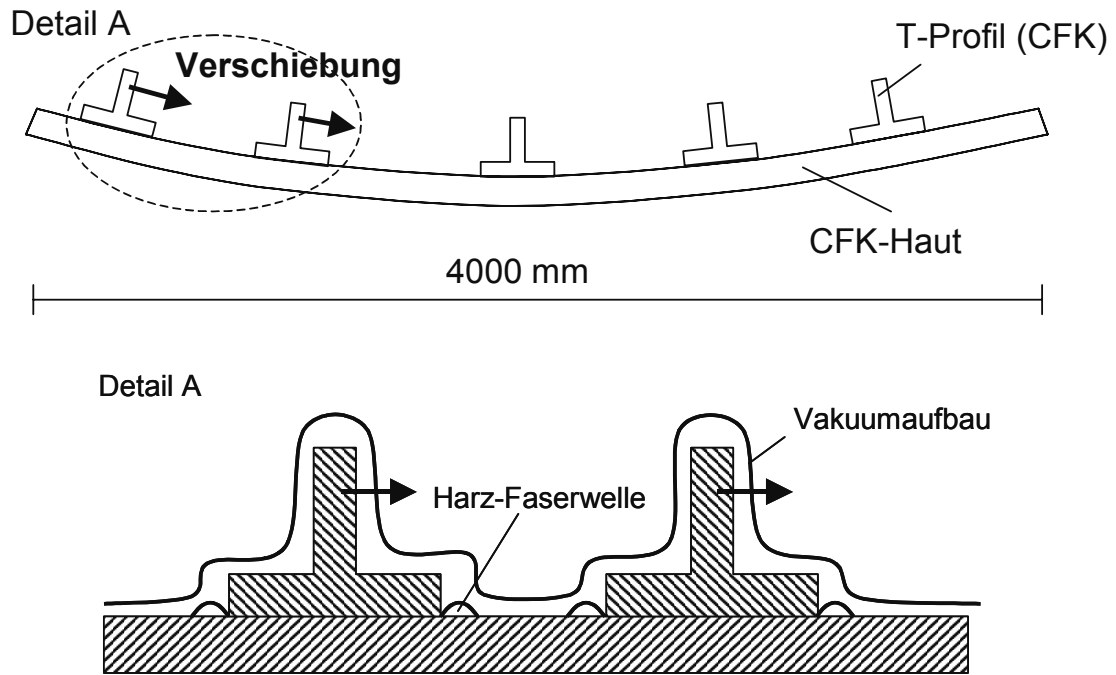


Abbildung 2-28: Verschiebung von Profilen am Beispiel einer A400M-Flügelschale

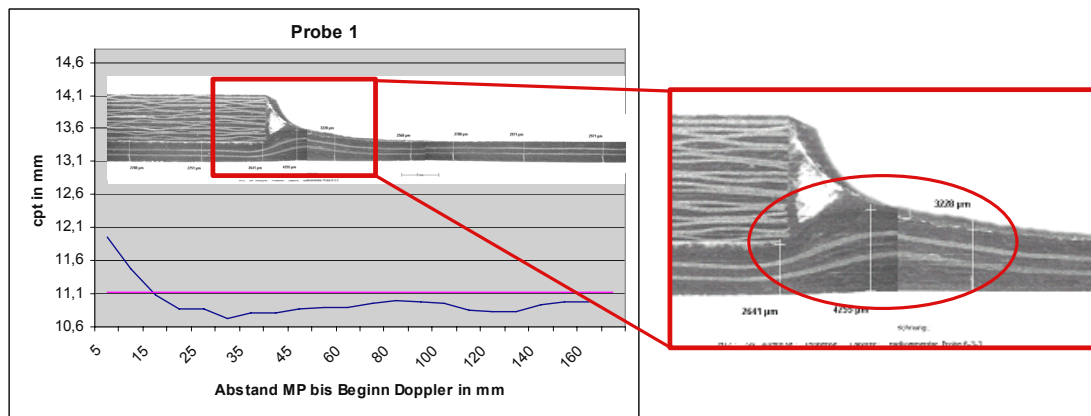


Abbildung 2-29: Messung sowie Schnittbild einer Faserwelle

Abbildung 2-29 zeigt, dass die Vakuumfolie über das Profil zur Haut abspannt. In diesem Dreieck kann keine Konsolidierung unter Druck stattfinden, gemäß Diagramm entsteht über eine Länge von 10-15 mm eine Dickenabweichung / Welle von >1 mm, was bei 18 Profilen einer A400M-Flügelschale eine durchschnittliche Längenreduzierung der Fasern von knapp 2 mm bedeutet.

3. Nutzung asymmetrischer Profile

Besonders problematisch ist die Verwendung von asymmetrisch vorausgehärteten Profilen. Hierbei werden die vorgefertigten Profile nachträglich in einem mechanischen Fräsprozess bearbeitet (Abbildung 2-30) und anschließend im Co-Bonding²⁰-Verfahren mit der Haut verklebt.

²⁰ Co-Bonding bezeichnet das Verkleben einer bereits ausgehärteten (harten) mit einer noch unausgehärteten (nassen) Struktur.

Durch das unterschiedliche Widerstandsmoment / Querschnitt des Profils entstehen nichtlineare Geometrieabweichungen, die sich nicht durch ein Offset²¹ berücksichtigen lassen.

Ist die Toleranz / Verschiebung in Abbildung 2-27 und Abbildung 2-28 durch entsprechendes Vorhalten beherrschbar, so ist der Toleranzverlauf bei asymmetrischen Profilen ebenfalls asymmetrisch und damit kritisch für den Montageverlauf.

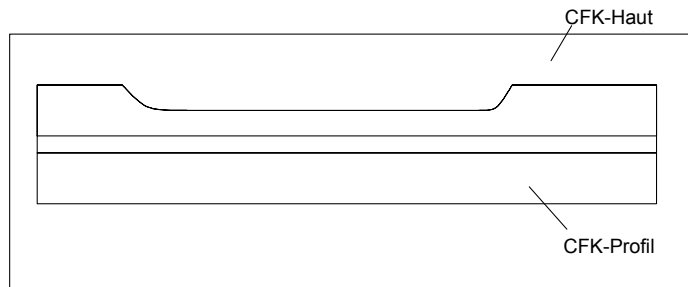


Abbildung 2-30: Asymmetrisches Profil auf einer CFK-Haut

Das Montagesystem selbst bzw. die Montagevorrichtung muss die Summe aller Einzeltoleranzen kompensieren können. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das Montagekonzept von außen nach innen erfolgt. Abbildung 2-31 zeigt, dass in der Vorrichtung der Ausenstrak die Sollkontur vorgibt, d.h. alle Toleranzen müssen nach Innen kompensiert werden. Dies ist erforderlich, da die Außenstruktur im Windkanal oder in der Strömungsanalyse vorgegeben wird und somit eine wichtige Funktion der Komponenten übernimmt. Diese Vorgehensweise ist eine Besonderheit in der CFK-Bauteilmontage.

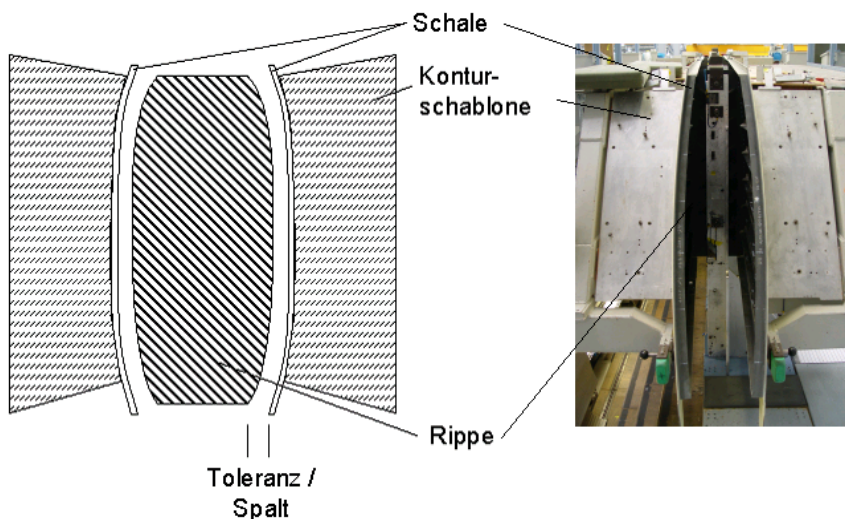


Abbildung 2-31: Aufbau einer Seitenleitwerksmontagestruktur

Aufgrund der in der Konstruktionsphase nicht definierbaren Toleranzen muss das Montagekonzept sehr flexibel auf die maximal mögliche Toleranzbreite einstellbar sein.

²¹ Unter Offset versteht man das absichtliche Vorhalten von Bauteilen, um geometrischen Abweichungen während des Prozesses entgegen zu wirken.

Im Gegensatz zur metallischen Montage, wo das Montagekonzept von innen nach außen erfolgt (Toleranzen $<1-2\text{ mm}$), ist in der CFK-Montage diese Bauweise nicht umsetzbar und damit als sehr kritisch einzustufen.

Lösungsansätze zur Vermeidung bzw. Reduzierung dieser Problemfelder werden in Kapitel 4.3 diskutiert.

2.3.5 Ausrüstungsmontage

Die Ausrüstungsmontage bestimmt die Funktionen der Komponente. Bei einem Seitenleitwerk sind dies zum Beispiel:

- Ansteuerung des Ruders über Aktuatoren (Abbildung 2-32),
- Antennensystem,
- Beleuchtungssystem,
- Kamerasysteme.



Abbildung 2-32: Aktuator eines Airbus-Seitenleitwerks

Die Basiselemente der Ausrüstungsmontage sind in der Regel:

- Hydraulikleitungen (Rohre), siehe Abbildung 2-33,
- Elektrische Kabel- und Kabelbündel,
- Aktuatoren, d.h. Steuerelemente,
- Halter.

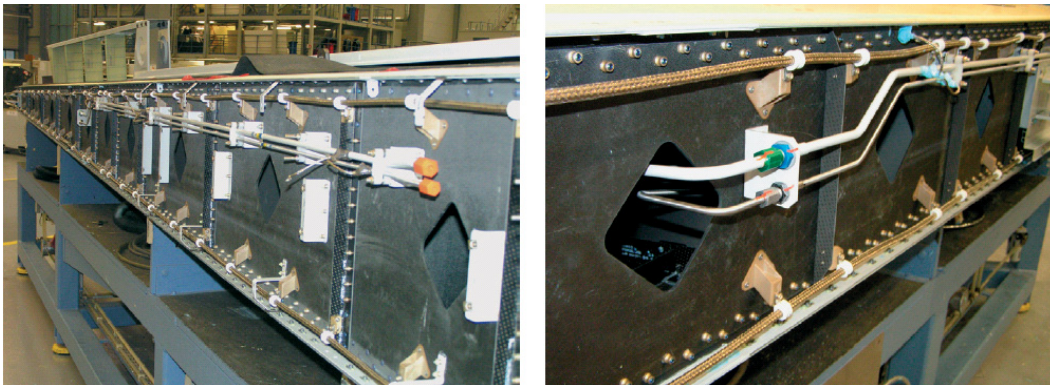


Abbildung 2-33: Hydraulikleitungen an einem Airbus-Seitenleitwerk

Entsprechend dem Wertefluss der Komponente erfolgt die Ausrüstungsmontage in zwei getrennten Prozessschritten.

Zur Komplexitätsreduzierung und aus organisatorischen Gründen sollte der maximal mögliche Anteil in der Vormontage montiert werden. Der zweite Teil erfolgt dann nach der Strukturmontage im Takt- oder Fließprinzip. Die Vorteile dieser Vorgehensweise liegen in der ergonomischen Zugänglichkeit der Bauteile und in der zeitlichen Abfolge der Arbeiten. Allerdings ist in diesem Zusammenhang darauf zu achten, dass keine bzw. nur eine geringe Anzahl zusätzlicher Schnittstellen, Koppelstellen bei der Elektrik und Hydraulikleitungen entstehen.

Die Ausrüstungsmontage ist geprägt durch manuelle Tätigkeiten und kaum automatisierbar.

3 Automatisierungsmöglichkeiten in der CFK-Teilefertigung zur Komplexitätsreduzierung

3.1 Aufgaben und Ziele der Automatisierung

Der Einsatz von automatisierten Prozessen in der CFK-Teilefertigung beinhaltet nicht nur direkte Kosteneinsparungen aus dem Produktionsverfahren. Insbesondere indirekte Einsparungen über die Qualitätsoptimierung (Ausschuss, Nacharbeit) sind ein bestimmender Faktor der Automatisierung. Dies wird erreicht, wenn die Prozesse in Einzelschritte zerlegt, automatisiert und gleichzeitig standardisiert werden. Herstellungsprozesse in der Einzelteilfertigung bestehen aus 20–50 manuellen Einzelschritten und laufen in der Regel über 3–5 Schichten mit entsprechender Schichtübergabe und Arbeitsablaufdokumentation. Automatisierte Systeme ermöglichen eine Komplexitätsreduzierung bei gleichzeitiger automatischer Dokumentation der Prozessparameter. Abweichungen lassen sich somit schnell analysieren und abstellen. Der Fertigungs- und Herstellungsprozess in der CFK-Teilefertigung gliedert sich in drei Grundfunktionen:

- Funktion Fertigung Rohbauteil,
- Funktion Bearbeiten,
- Funktion Fördern und Speichern.

3.2 Automatisierung der Funktion Fertigung Rohbauteil

Im Rahmen der Rohteilherstellung sind die Automatisierungsansätze abhängig von der Geometrie des Bauteils und der Verfahrenstechnologie. Am Beispiel des Prepreg²²-Verfahrens und der Prozesskette des nasstechnologischen RTM-Verfahrens /13/ sollen die Automatisierungspotenziale untersucht und dargestellt werden.

3.2.1 Tapeleger – Automatisierte Ablage von CFK-Rohmaterialien

Der im folgenden beschriebene Tapelege-Prozess basiert auf dem lagenweisen Aufschichten von CFK-Prepreg-Material.

Im Gegensatz zum chemischen Abtragen bei Aluminium, wo die Gewichtsreduzierung über die Gesamtstärke des Materials stattfindet, wird bei Schichtwerkstoff Prepreg von der minimalen zur maximalen Werkstückdicke gearbeitet. Damit wird der Materialverlust auf ein Minimum reduziert.

²² Prepreg ist die englische Kurzform für preimpregnated fibres (vorimprägnierte Fasern). Prepreg bezeichnet dabei ein Halbzeug, bestehend aus Endlosfasern und einer ungehärteten duroplastischen Kunststoffmatrix.

Mit der Entwicklung neuer Bauteilstrukturen, d. h. Abmessungen bis zu 80 m² und Bauteilgewichten von 500–3.500 kg sowie Stückzahlen von 60–100 Großkomponenten im Monat war die bestehende manuelle Legetechnologie nicht mehr einsetzbar.

Ausgehend vom manuellen Legeprozess /11/, d. h. Anlieferung von 800–1.000 mm Tapebreiten, dem Ultraschall-Cutterprozess²³ und dem manuellen Legen der Tapelege ist maximal eine Legeleistung von 3–4 kg/h umsetzbar. Dies beinhaltet die kritische Zugänglichkeit zum Bauteil, nicht aber Qualitätsprobleme im Lagenaufbau (Poren) durch unzulässigen manuellen Anpressdruck der Tapelagen.

Aus dieser Gesamthematik heraus wurden mit entsprechenden Lieferanten automatisierte Tapelegeanlagen entwickelt und realisiert. Grundsätzlich besteht die Tapelegeanlage aus zwei Funktionselementen:

- der Maschine und
- dem Legekopf.

Die Maschine übernimmt die Führung des Legekopfes und besteht aus den x,y,z-Linearachsen und der Drehachse C um z.

Aufgrund des Materialverhaltens beim Legeprozess sind die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte mit industrieüblichen Vorschubsystemen (Ritzel, Zahnstange oder Kugelrollspindel) umsetzbar.

	Geschwindigkeit	Beschleunigung	Positioniertoleranz
x-/y-Achse	60.000 mm/min	0,7 m/s ²	+/- 0,1 mm
z-Achse	15.000 mm/min	0,7 m/s ²	+/- 0,1 mm
C-Achse	8.500 °/min	92,6 °/s ²	+/- 50''

Tabelle 3-1: Maschinendaten von Tapelegeanlagen

In der Industrie werden zwei Anlageprinzipien eingesetzt (siehe Abbildung 3-1).

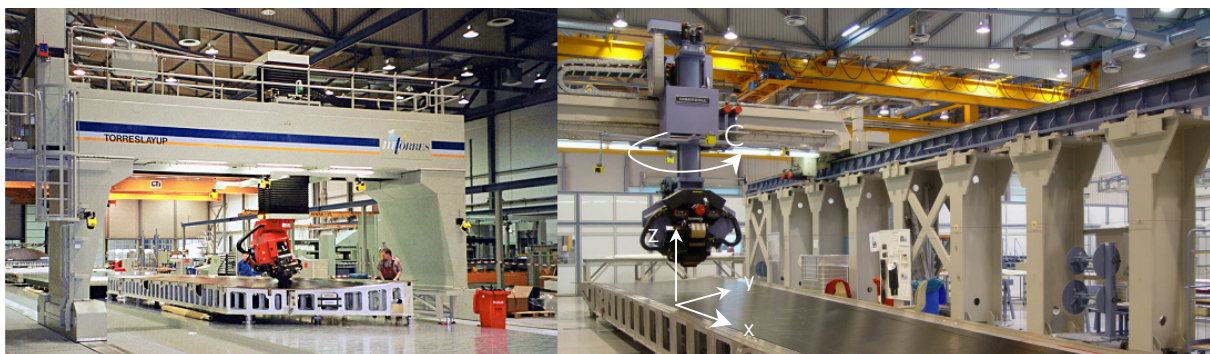


Abbildung 3-1: Gantry-Prinzip (hier Fa. Torres, links) sowie Traversen-Prinzip (hier Fa. Ingersoll, rechts)

²³ Cutter sind computergesteuerte Maschinen für den Zuschnitt von textilen und biegeschlaffen Materialien. Vorzugsweise werden durch Ultraschall zur Oszillation gebrachte Schneidwerkzeuge verwendet.

Ausschlaggebend für den Einsatzfall sind die Investitionskosten und die erforderliche Zugänglichkeit zur Maschine, d. h. Ver- und Entsorgung der Vorrichtung zur Maschine.

Beim Maschinenaufbau handelt es sich in der Regel um standardisierte Anlagenkomponenten, das Know-how des Legeprozesses und somit die Legeleistung kg/h bestimmt der Legekopf.

Abbildung 3-2 zeigt den Aufbau eines Tapelegekopfes.

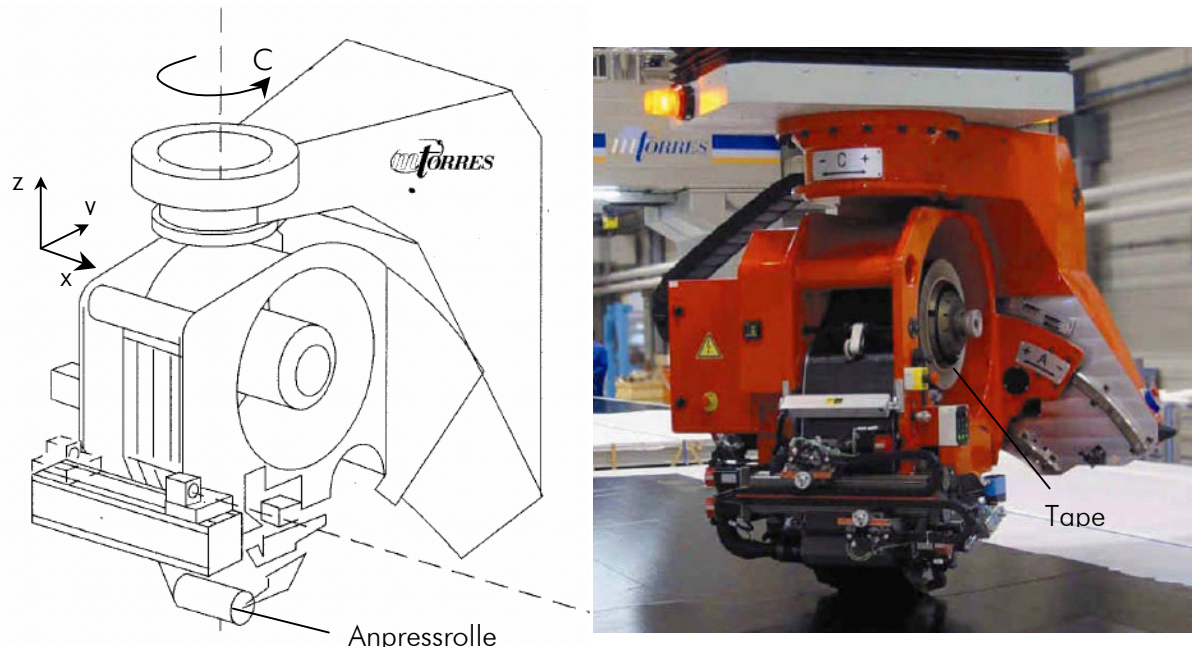


Abbildung 3-2: Prinzip eines Tapelegerkopfes (Quelle: Mtorres)

In Abhängigkeit vom Bauteilspektrum werden heute üblicherweise Tapebänder mit Breiten von 125–300 mm eingesetzt. Die angelieferten Tape coils mit Längen bis 600 m werden im Kopf über der Haspel positioniert und ins System eingefädelt. Entscheidend für die Bandbeschleunigung ist das Tack-Verhalten²⁴ des Materials nach dem Aufsetzen und Beschleunigen der Anlage. Das Tack-Verhalten des Materials wird beim Herstellungsprozess des Prepreg beim Materiallieferanten erzeugt. Durch den Einsatz des Harzes beim Imprägnieren der trockenen CFK-Fasern entsteht je nach Faser-/Harzanteil, Harzspezifikation und Verarbeitungstemperatur ein spezifisches Klebeverhalten des Prepregs, auch Tack-Verhalten genannt.

Um den Haftungsprozess zu optimieren, wird im Kopf eine Spulenheizung eingesetzt. Diese verhindert ein Abziehen des Tapes von der Vorrichtung bzw. vom Bauteil und garantiert gleichzeitig die sichere Trennung des Tapes vom Transportmedium Papier. Ein weiteres qualitätsbestimmtes Maschinenelement ist die Anpressrolle. Der Anpressdruck sollte mindestens 0,3 kg/mm² betragen. Über den Anpressdruck wird das Restluftvolumen zwischen

²⁴ Tack bezeichnet das Klebeverhalten des Tapematerials

den Lagen und im Bauteil bestimmt. Bei einer Tapestärke von 0,18-0,25 mm und Bauteildicken bis 40 mm, entsprechend 160–220 Lagen, ist dieser Prozessparameter entscheidend für die innere Qualität des Bauteils (Porenansammlung). Nach dem Ablegen der Tapelage erfolgt der Tapeschnitt. Hierzu ist eine sehr hohe Präzision erforderlich, da nur das Tape, nicht jedoch das Trägerpapier getrennt werden darf. Als besonders geeignet haben sich für diesen Prozess / Schnitt Ultraschall-Messer erwiesen.

Um die Automatisierung des Tapelegens abzusichern, werden diverse Sensoren und Systeme eingesetzt:

- Bandführungssystem (mit integriertem Luftpolster zur besseren Führung des Tapes),
- Fehlstellen- und Fremdkörpererkennung für nicht dokumentierte Fehler,
- Schneidvorrichtung im Kopf,
- Tape-Heizsystem,
- Automatische Tapezentrierung,
- Messung des Taperollendurchmessers,
- Messung des Backing-Paper²⁵-Rollen-Durchmessers,
- Legeschuhsensorik,
- Positionserfassung / Referenziereinrichtung,
- Lagenprüfung,
- Lagenkennzeichnung.

Neben der eigentlichen Anlage und deren Prozessabsicherungsfunktionen ist für den Tapelegeprozess und der daraus resultierenden Legeleistung eine tapelegegerechte Bauteilkonstruktion erforderlich.

3.2.1.1 Tapelegegerechte Bauteilkonstruktion

Entscheidend für den Erfolg einer tapelegegerechten Bauweise ist die Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Fertigungsbetreuung in der ersten Phase der Bauteilbestimmung. Drei Faktoren bestimmen maßgeblich die Qualität, das Strukturgewicht und die Fertigungszeit eines Tapegeleges / Bauteils:

- Anordnung der Rampen bei Wanddickensprüngen,
- Ausführung der Schnittkanten,
- Tape und Maschinentoleranzen.

²⁵ Backing Paper bezeichnet eine Papierlage auf der Rückseite des Prepreg-Materials, die ein Zusammenkleben des Materials vor dem Fertigungsverfahren verhindern.

Sind Rampen unvermeidbar, so sind für den automatischen Tapelegeprozess folgende Randbedingungen einzuhalten (siehe auch Abbildung 3-3):

- Ist das Steigungsverhältnis kleiner als 1:20, darf der Höhenunterschied nicht größer als 35mm sein.
- Ist das Steigungsverhältnis kleiner als 1:10, darf der Höhenunterschied nicht größer als 10mm sein.
- Ist das Steigungsverhältnis kleiner als 1:5, darf der Höhenunterschied nicht größer als 8mm sein.
- Ist das Steigungsverhältnis 1:2, darf der Höhenunterschied nicht größer als 4mm sein.
- Das Steigungsverhältnis darf nicht kleiner als 1:2 sein.

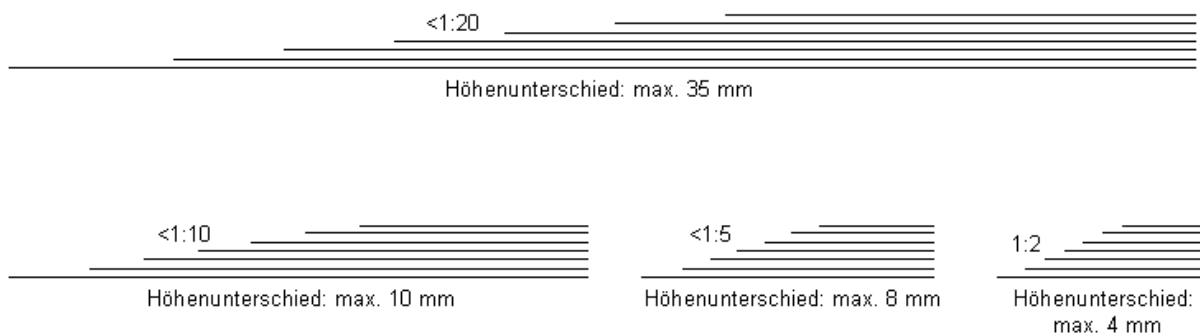


Abbildung 3-3: Randbedingungen für Rampen im Tapelegeprozess

Abgeleitet aus der Anlagen-Kopffunktionalität ergeben sich gemäß Abbildung 3-4 folgende Kantengeometrien, die bei der konstruktiven Auslegung unbedingt berücksichtigt werden müssen.

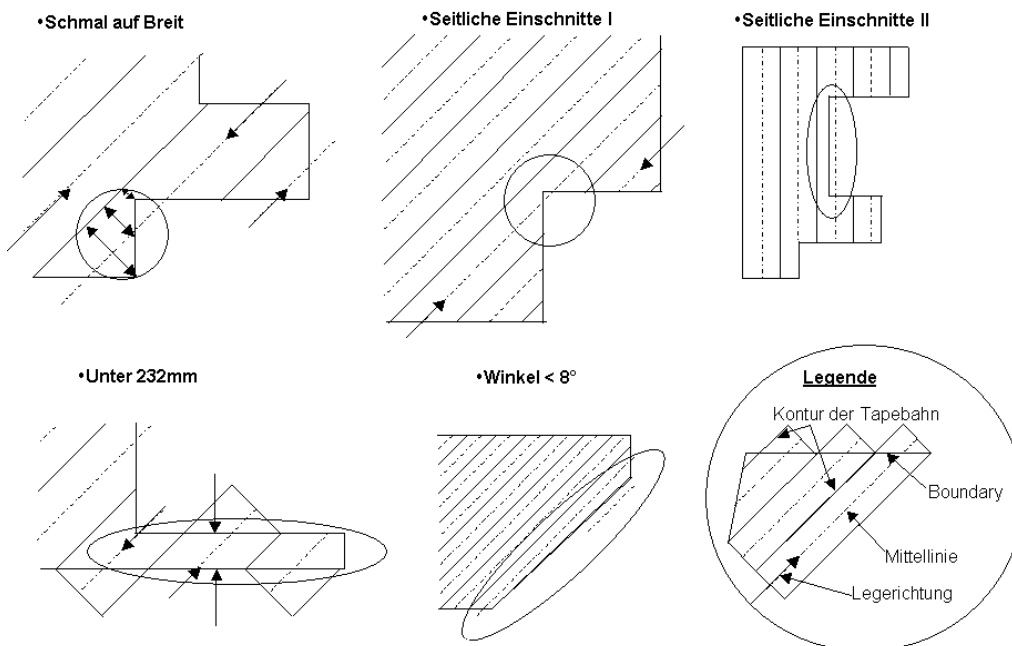


Abbildung 3-4: Kantengeometrien – Beispiele für nicht geeignete Schnittkanten

Im Weiteren ist darauf zu achten, dass die Boundaries²⁶ so konstruiert sind, dass die Breite ein ganzzahliges Vielfaches der Materialbreite ist.

Ist dies in Ausnahmefällen bei 0°- oder 90°-Lagen nicht möglich, so sollte die Breite des Abfalls nicht größer als 1/3 der Materialbreite sein.

Für die Auslegung des Bauteils sind die Überlappung (-) und Spaltmasse (+) der einzelnen Tapelagen wichtig. Stand der Technik sind heute Legegenauigkeiten beim 3D-Legen von – 1 mm bis +2mm und beim 2D-Tapelegen von 0mm bis +2mm. Die Toleranz der Bandlänge beträgt $\pm 1,5\text{mm}$ (Mittellinie Band) zur programmierten Länge bei 300mm Tapebreite. Die erzeugte Schnittlängengenauigkeit sollte innerhalb der Bandlängentoleranz liegen. Die Schnittwinkelgenauigkeit beträgt $\pm 0,2^\circ$ bei flachen Gelegen und $\pm 0,5^\circ$ bei Konturen. Lange Winkelschnitte dürfen nicht kleiner als 8° sein.

Zur weiteren Reduzierung der Legekomplexität und gleichzeitiger Erhöhung der Legeleistung um den Faktor 2-3 wurden im Airbus-Werk Stade umfangreiche Untersuchungen durchgeführt.

Ziel war es, abwickelbare, aber auch leicht 3D-gekrümmte Tapelegele im ebenen Zustand herstellen zu können.

Dabei wurde festgestellt, dass das Kriechverhalten der Tapelegele ohne Ondulationen²⁷ der Fasern möglich ist. Mit der erfolgreichen Umsetzung des überarbeiteten Produktionsverfahrens lassen sich heute Bauteile verschachtelt im ebenen Zustand unabhängig von der Lege- und Autoklavform herstellen.

Damit ist eine hauptzeitparallele Gelegefertigung zum Aufrüsten der Bauteile in der Legeform realisierbar und der Produktionszyklus, d.h. die Belegungszeit der Vorrichtung wurde um 50% reduziert.

3.2.1.2 Tapelegeköpfe zukünftiger Bauart

Aus oben genannten Gründen und Erkenntnissen wurden auf Basis wissenschaftlicher Analysen und Untersuchungen neue Formen der Maschinenbearbeitung und Legeleistung durchdacht.

Liegt die Legeleistung heutiger Tapelegemaschinen je nach Bauteilspektrum und angewandter Technologie zwischen 3 und 20 kg/h, so steht die Entwicklung neuer Legeköpfe heute ganz im Zeichen der Leistungserhöhung.

Die Entwicklung geht dabei in zwei Richtungen, der Leistungserhöhung bei

- ebenen Bauteilen oder
- stark gekrümmten Bauteilen.

²⁶ Als Boundaries werden die äußeren Abgrenzungen des vom Tapeleger gelegten Bauteils bezeichnet.

²⁷ Eine Ondulation bezeichnet die Umlenkung von Fasern innerhalb von Geweben. Dies führt zu einer Abnahme der faserparallelen Festigkeit des Gewebes.

Für den Einsatz ebener Bauteile wurde ein Forschungsprojekt mit den Firmen Mtorres, CTC GmbH und Airbus mit dem Ziel initiiert, die Wettbewerbsfähigkeit des Standortes Stade zu erhalten bzw. zu verbessern.

Das geförderte Projekt beinhaltet die Konzeption eines neuen Legekopfes (Abbildung 3-5) basierend auf der flexiblen Nutzung von 1-4 Einzeltapebändern mit einer Nennbreite von jeweils 150 mm. Jedes Tapeband ist einzeln angesteuert, es lassen sich somit Bandbreiten von 150-600 mm pro Legebahn erreichen (Abbildung 3-5), je nach Komplexität des Bauteils und der Verschnittoptimierung im Randbereich.

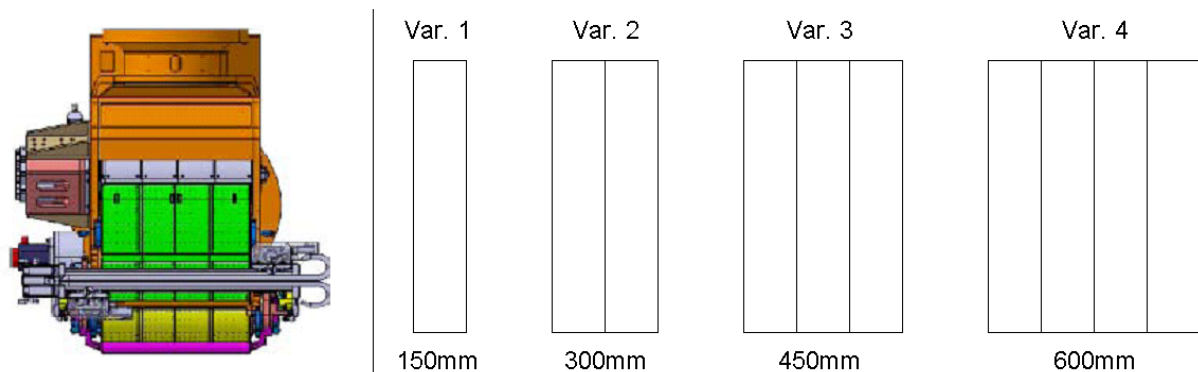


Abbildung 3-5: Tapelegerkopf neuer Generation zum Legen ebener Bauteile

Neben einer Leistungserhöhung um ca. 20-30% pro Bauteil ist zusätzlich eine Materialeinsparung gemäß Abbildung 3-6 durch eine verbesserte Verschnittoptimierung bei $\pm 45^\circ$ -Lagen von ca. 30% erreichbar.

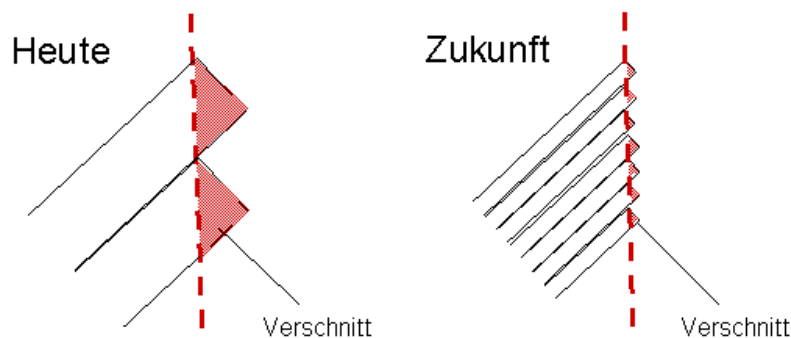


Abbildung 3-6: Verschnittoptimierung durch den Einsatz neuer Tapelegerköpfe

Für die Herstellung stark gekrümmter Bauteile werden heute Maschinen nach dem Fibre-Placement-Verfahren²⁸ eingesetzt (Abbildung 3-7). Die Legeleistung dieser Maschinen beschränkt sich jedoch auf 5-10 kg/h.

²⁸ Automated Fibre Placement bezeichnet das automatisiertes Ablegen von duroplastischen und thermoplastischen Halbzeugen.

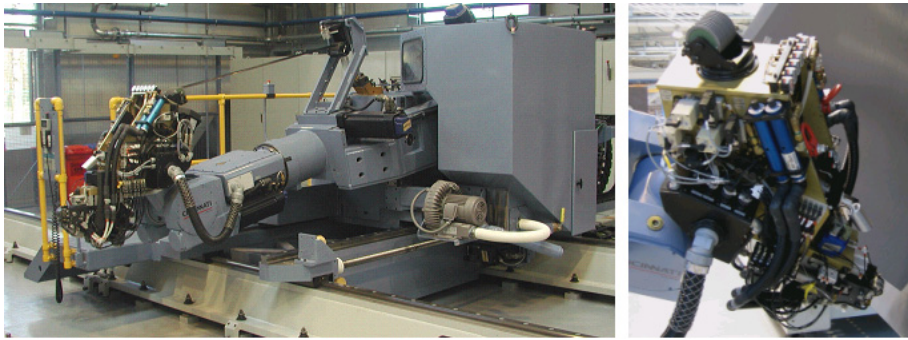


Abbildung 3-7: Beispiel einer Fibre-Placement-Anlage (Quelle: CTC GmbH)

Abbildung 3-8 zeigt eine mögliche Weiterentwicklung dieser Technologie mit segmentiertem Tape, abgeleitet aus der oben dargestellten Konzipierung.

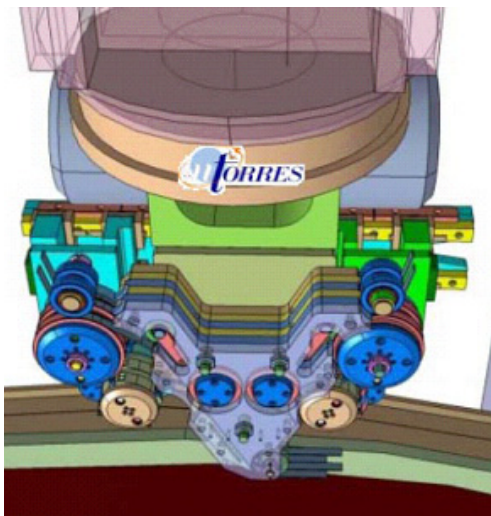


Abbildung 3-8: Zukünftiger Fibre-Placement-Kopf (Quelle: Mtorres GmbH)

Das Konzept basiert dabei auf folgenden Optimierungen:

- Einsatz fliegender Messer, wodurch kein Zwischenstopp für den Tapeschnitt erforderlich ist,
- Erhöhung der einzelnen Tows pro Legevorgang,
- Kurvenfahrten durch Einzelantrieb der Tows, wodurch das Legen sehr komplexer Strukturen möglich wird,
- Fertigung von stark gekrümmten Bauteilen (mit einem Radius von 15 m oder kleiner),
- maximale Verschnittreduzierung.

Unter Berücksichtigung aller Parameter ist eine Legeleistungserhöhung auf 20-30 kg/h geplant bzw. erreichbar.

3.2.2 AutoVac - Automatisierung der Schalenfertigung

Die Herstellung von großflächigen Strukturbauteilen in der Flugzeugindustrie basiert auf der Verwendung von flächigem Tape oder Gewebelagen in Verbindung mit Strukturelementen wie z.B. Versteifungsprofilen in unterschiedlichen Ausführungen (T , I , Ω).

Das Zusammenführen dieser Elemente und der anschließende Vakuumaufbau sind bis heute stark manuell geführte Prozesse. In der Analyse der Herstellkosten ist diese Teilfunktion die personalintensivste und beinhaltet ca. 2/3 der Gesamtkosten (Stand 2007, ohne Materialeinsatz).

Gelingt es in diesem Bereich des CFK-Produktionsprozesses eine Industrialisierung umzusetzen, so entstehen mittelfristig neue Kostenstrukturen bei gleichzeitiger Automatisierung und einhergehender Prozessstabilität.

3.2.2.1 Automatisierter Vakuumaufbau

Im Rahmen des Konzeptansatzes zur Beherrschung des automatisierten Vakuumaufbaus wurde das Verbundprojekt „Pro-CFK“ /13/ initiiert. Die untersuchten Ansätze basieren auf der wissenschaftlichen Konzeption, den Vakuumaufbau nicht am realen Bauteil, sondern in einer Vorstufe vor der eigentlichen Produktion des Bauteils im Positionierträger vorzubereiten.

In den folgenden Abbildungen /13/ wird das Funktionsprinzip des patentierten Gesamtsystems gezeigt und im Weiteren näher erläutert. Das dargestellte Fertigungskonzept basiert dabei auf der Herstellung eines Rumpfsegmentes.

Die Fertigung des Rumpfsegmentes (Ablage des Prepregs) wird in einer Negativ-Halbschale (Formschale) ausgeführt, welche die Außenkontur des Flugzeugrumpfes abbildet. Für das neue Verfahren wird eine zusätzliche Vorrichtung (Positionierträger) eingesetzt (Abbildung 3-9). Diese bildet die Innenkontur der zu fertigenden Rumpfschale ab und enthält Aufnahmen für integral zu fertigende Strukturelemente (Stringer).

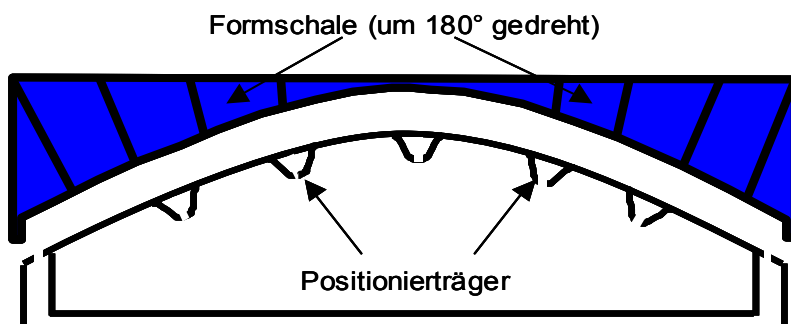


Abbildung 3-9: Formschale mit Positionierträger /13/

Als erster Schritt wird auf diesem um 180° gedrehten Positionierträger flächig eine Vakuumfolie aufgelegt. Diese wird durch Evakuieren des äußeren Ringkanals glatt auf dem Positionierträger fixiert (Abbildung 3-10).

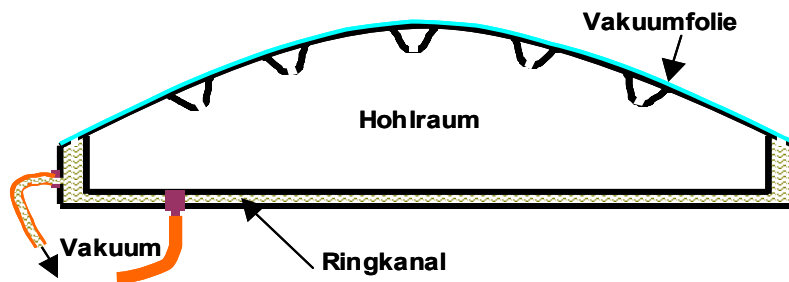


Abbildung 3-10: Auflegen und Fixieren der Vakuumfolie /13/

Anschließend kann durch Evakuieren des inneren Hohlraums der Vorrichtung die Vakuumfolie in die Kontur des Positionierträgers eingezogen werden, so dass diese genau die spätere Innenkontur des Bauteils abbildet (Abbildung 3-11).

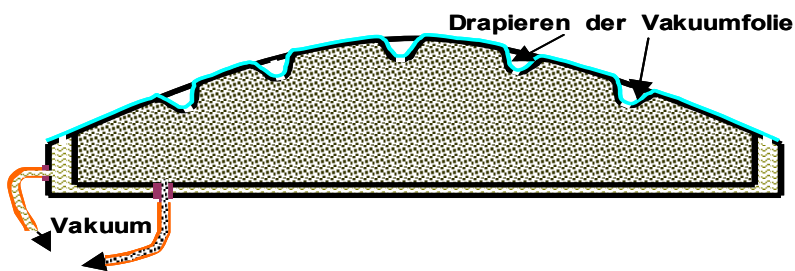


Abbildung 3-11: Drapieren der Vakuumfolie /13/

In die dafür vorgesehenen, von der Vakuumfolie bedeckten Profalnuten werden mit Stützelementen versehene Stringerprofile eingelegt (Abbildung 3-12).

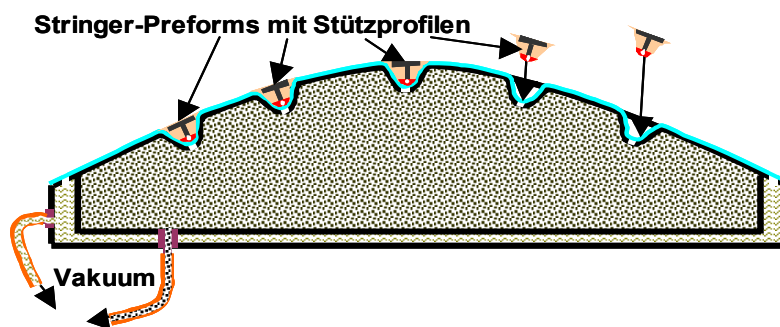


Abbildung 3-12: Einlegen der Stringer /13/

Hierauf werden alle Laminatschichten der Außenhaut abgelegt (Abbildung 3-13).

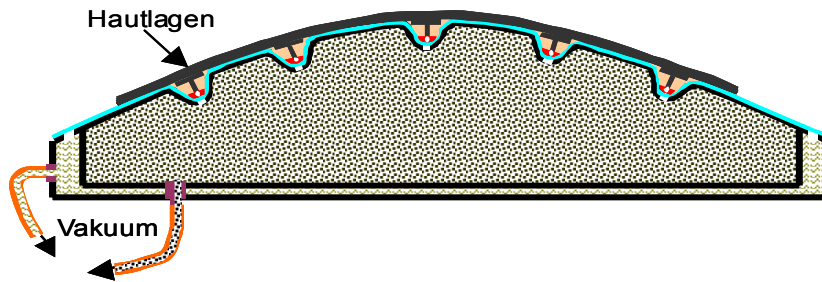


Abbildung 3-13: Auflegen des Hautlaminats /13/

Umlaufend wird auf die Vakuumfolie eine Siegelmasse (Dichtkitt) aufgetragen (Abbildung 3-14).

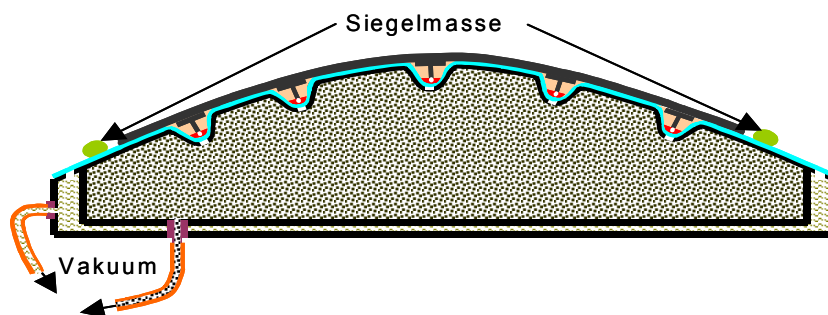


Abbildung 3-14: Aufbringen der Siegelmasse /13/

Jetzt kann die Formschale positionsgenau auf dem Positionierträger platziert werden, wodurch die Siegelmasse verdichtet wird und so eine vakuumdichte Siegelung zwischen Vakuumhaut und Formschale entsteht (Abbildung 3-15).

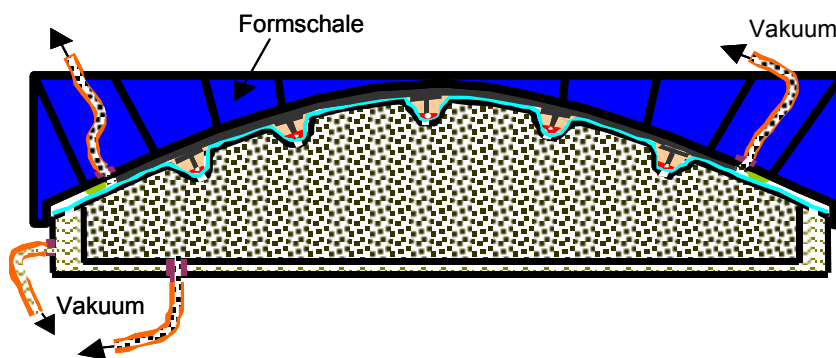


Abbildung 3-15: Aufsetzen der Formschale /13/

Die entstandene Kavität zwischen Formschale und Vakuumfolie wird evakuiert. Nach Erreichen des Prozessvakuum können die Hohlräume im Formträger zur Atmosphäre geöffnet werden. Die Formschale kann mit komplettem Lay-Up abgehoben und einem Aushärtungsprozess zugeführt werden (Abbildung 3-16).

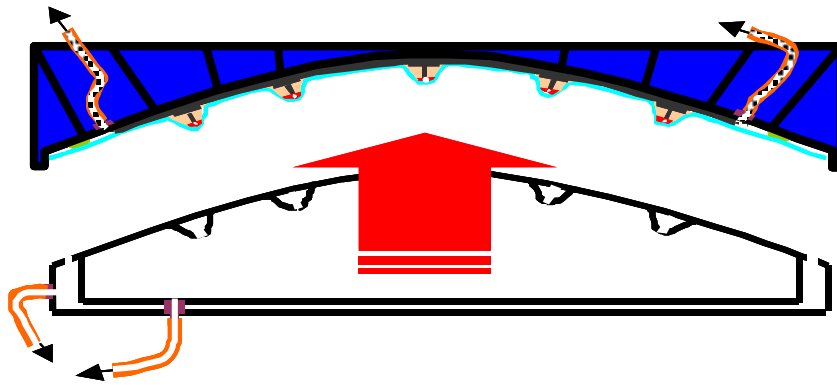


Abbildung 3-16: Abnehmen der Formschale /13/

Der Prozess „Automatischer Vakuumaufbau“ beginnt, wie in Abbildung 3-10 bereits erläutert, mit dem Auflegen der Vakuumfolie über den äußeren Ringkanal auf die Vorrichtung. Augenmerk ist dabei auf die Drapierfähigkeit bzw. das Dehnverhalten der Folie zu legen. Der Nachweis wird mit einem Zwei-Stufen-System geführt, das die Drapier- und Dehnfähigkeit beschreibt. Entsprechend wurden mit einem Versuchswerkzeug verschiedene Folien hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit geprüft.

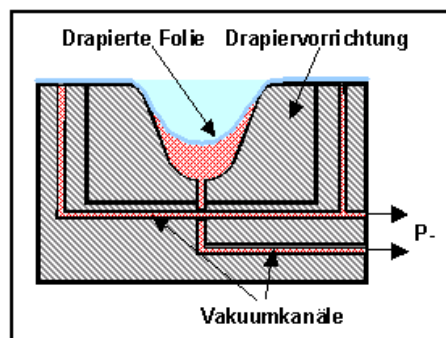
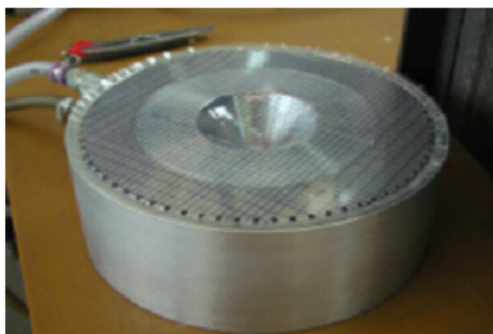


Abbildung 3-17: Versuchswerkzeug zum Drapieren von Folien sowie Funktionsprinzip /13/

Nach einem fest vorgegebenen Bewertungssystem wurden gemäß Tabelle 3-2 die relevanten Kennwerte /17/ definiert und mit Punkten (0 = nicht ausreichend bis 4 = sehr gut) bewertet und dann mit einem Gewichtungsfaktor (0-10) multipliziert.

Kennwert	Wertigkeit	Bewertungsskala				
		4 Punkte	3 Punkte	2 Punkte	1 Punkt	0 Punkte
Vakuumdichtigkeit (Druckverlust)	10	<1 mbar/min	<4 mbar/min	<8 mbar/min	<12 mbar/min	>16 mbar/min
Drapierfähigkeit	4	Kegelboden erreicht	-	-	-	Kegelboden nicht erreicht / gerissen
Drapiervakuum	1	<200 mbar	<350 mbar	<500 mbar	<650 mbar	>650 mbar
Temperaturbereich	2	>200°C	>175°C	>150°C	>125°C	<125°C
Dicke der Folie im drapierten Bereich	2	>80%	>60%	>40%	>20%	<20%
Rückstellverhalten	1	<20%	<35%	<50%	<65%	>65%
Lieferbare Foliendicke	3	≥100µm	≥75µm	≥50µm	≥35µm	<35µm
Trennverhalten	5	ja	-	-	-	nein

Tabelle 3-2: Bewertungsschema und Gewichtungsfaktoren /13/

Insgesamt wurden elf Vakuumfolien und acht Trennfolien²⁹ geprüft.

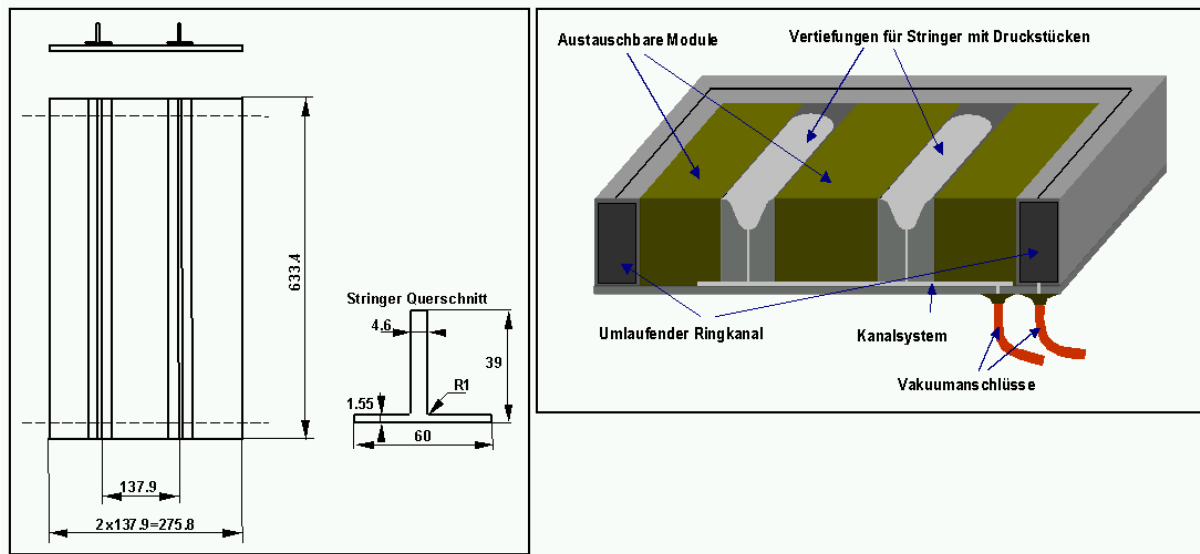


Abbildung 3-18: Geometrie der Versuchsschale sowie Schnittdarstellung des Positionierträgers /13/

Ausgehend vom Idealwert (112 Punkte) lag die Ergebnisspanne bei den Vakuumfolien zwischen 17 und 81 Punkten und bei den Trennfolien zwischen 20 und 67 Punkten. Sieben der untersuchten Folien erfüllten die Randbedingungen, diese wurden dann über eine Versuchsvorrichtung (siehe Abbildung 3-18) einem realen Funktionstest entsprechend dem Sollprinzip des „Automatisierten Vakuumaufbau“ unterzogen.

Folgende Verfahrensschritte charakterisieren die Bewertungsmatrix:

- Fixierung der Folie auf dem Positionierträger durch den umlaufenden Ringkanal,
- Drapieren der Folie in die Kontur / Vertiefung,
- Einlegen der Druckstücke,
- Auflegen der Hautlagen (Trockengewebe),
- Anschließen der Infusionsleitungen,
- Aufbringen des Kittbandes,
- Aufsetzen der Formschale,
- Übergabe des Lay-up an die Formschale,
- Trennung der Formschale vom Positionierträger,
- Infusion des Bauteils im Ofen.

Eine Verwendung des Prozesses im Rahmen der Prepregtechnologie anstelle der Infusions- oder Nasstechnologie ist ebenfalls mit gleichen Ergebnissen / Bewertungen erzielbar.

²⁹ Trennfolien verhindern das Verkleben des Prepregharzes mit dem Belüftungsgewebe.

Besonders das Kriech- und Dehnverhalten der Folie ist ein entscheidender Schritt, der die komplexe Abbildung der Bauteilstruktur erlaubt. Zudem konnte die Drapierfähigkeit der Folie noch durch die Konditionierung mittels Wärme erheblich verbessert und damit ein weiterer entscheidender Vorteil erarbeitet werden.

Die für den Ablegeprozess zuständige Vorrichtung zeigt Abbildung 3-19. Die Vorrichtung übernimmt die Lagerung der 3.100 mm breiten Folienrolle, das Zuschneiden der Foliengänge sowie die Applizierung auf dem Positionierträger.

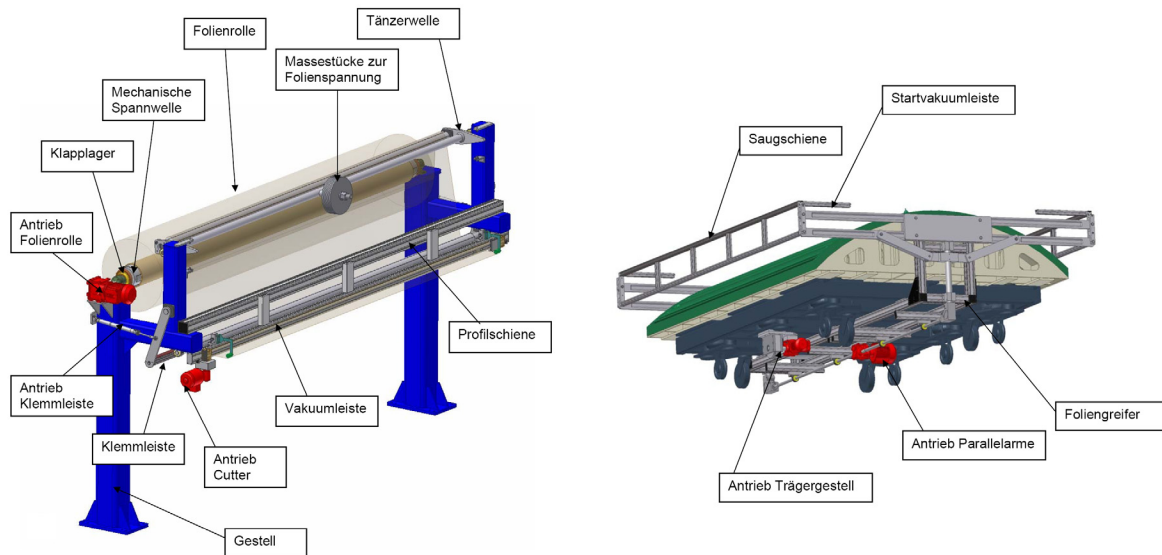


Abbildung 3-19: 3D-Modell der Abrollvorrichtung /13/

Nach dem Drapieren der Vakuumfolie wird der Positionierträger in die Fertigungszelle (Abbildung 3-20) eingefahren.

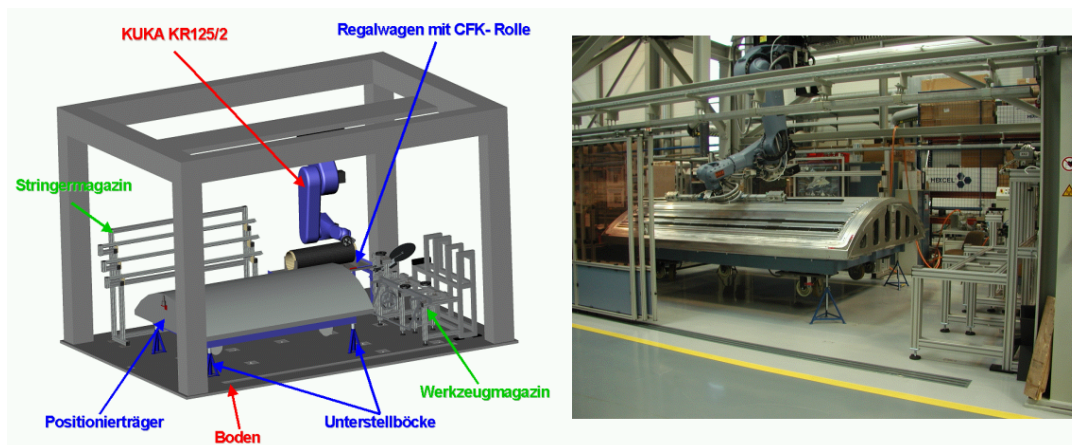


Abbildung 3-20: 3D-Modell der Fertigungszelle (links) sowie umgesetzte Fertigungszelle /13/

Mittels eines 6-Achsen Knickarmroboter erfolgt anschließend das Einlegen der vorkonfigurierten Stringerpakete (siehe Konzeptbild Abbildung 3-21) aus dem Magazin in die entsprechenden Ausfräsungen des Positionierträgers.

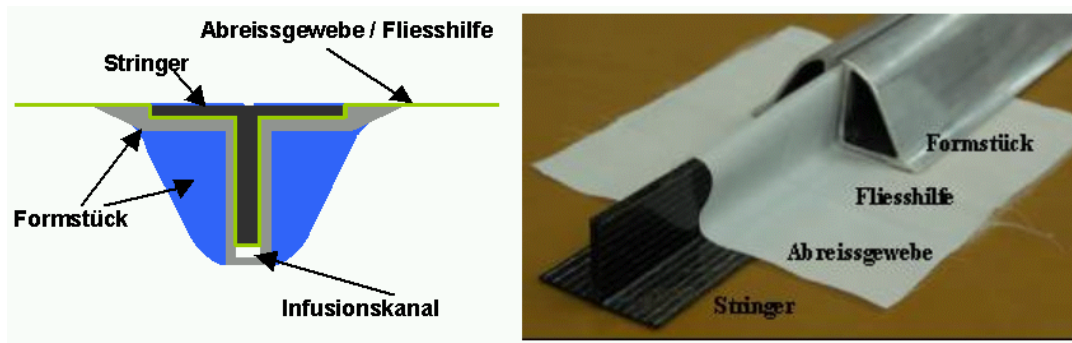


Abbildung 3-21: Prinzipbild einer vorkonfektionierten Stringer-Preform mit Hilfsstoffen und Formstück /13/

Das in Abbildung 3-22 dargestellte Greifersystem besteht im Wesentlichen aus einem Standard-Aluminium-Systemprofil, sowie integrierten Dauermagneten mit jeweils zwei pneumatischen Halbzylindern an den Enden.



Abbildung 3-22: Stringergreifer /13/

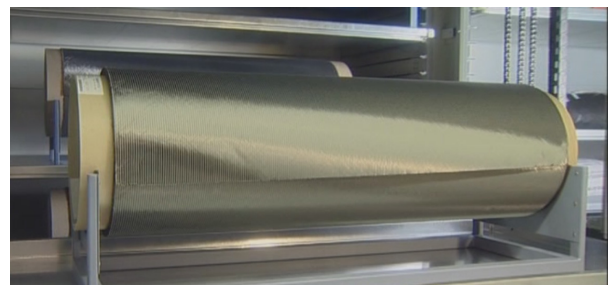


Abbildung 3-23: Bereitstellung des MAG³⁰ /13/

Damit der Greifer einwandfrei funktionieren kann, werden die Formstücke (siehe Abbildung 3-21) mit ferromagnetischem Material ausgestattet. Nach dem Einlegen und Positionieren der Stringerpakete wird das trockene Gelege für die Schale als Multiaxial- oder Tapegelege auf den Positionierträger aufgelegt.

Abbildung 3-23 zeigt eine spätere Außenhaut in Form eines Multi-Axial-Geleges.

Für die Automatisierung des Prozesses „Bereitstellung / Ablegen und Abtransport“ der Rollen und Materialien ist eine Fertigungszelle gemäß Abbildung 3-24 denkbar bzw. umsetzbar.

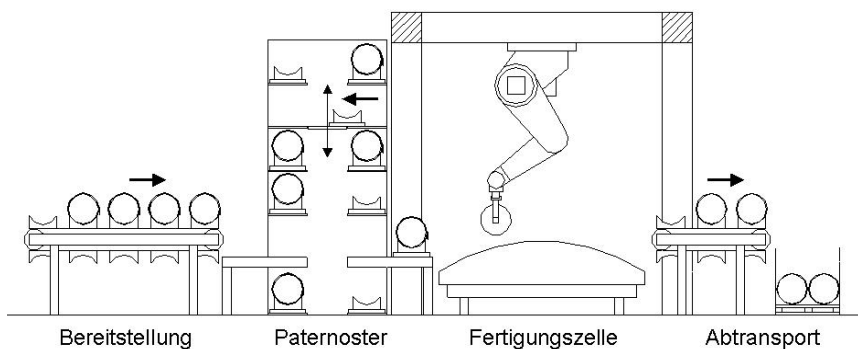


Abbildung 3-24: Layout einer Fertigungszelle /13/

³⁰ MAG ist die Kurzform für Mult-Axial-Gelege

Das Wirkkonzept der Zelle basiert auf der Bereitstellung der jeweiligen Hautlage, einer automatischen Zwischenlagerung im Paternoster sowie der bedarfsgerechten Bereitstellung zum Roboter über entsprechenden Datenleitungen und Signale.

Nach dem Ablegen der Hautlagen wird die jeweilige Leerrolle wieder abtransportiert und neu bestückt.

Als kritischer Prozessschritt erweist sich das Positionieren und Abrollen des Geleges von der Rolle auf den Positionierträger.

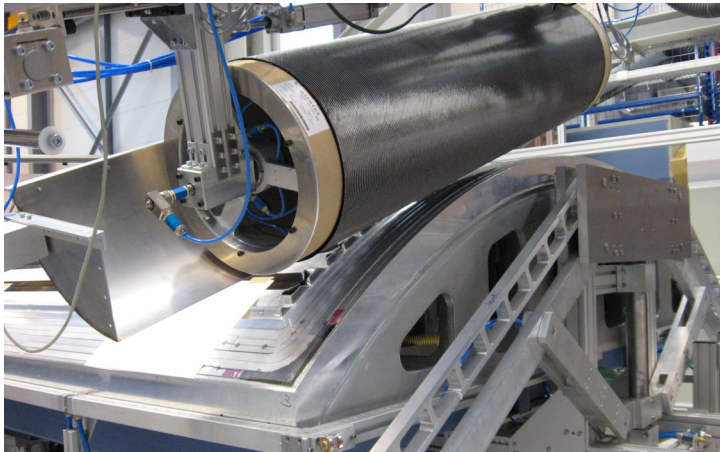


Abbildung 3-25: Beginn des Ablegens /13/

Abbildung 3-25 zeigt den Versuchsträger beim Beginn der Ablage.

Insbesondere die Synchronisation der Rollendrehzahl und die Verfahrgeschwindigkeit des Roboters stellen eine erhebliche Herausforderung dar und bestimmen somit die Lagetoleranz der Hautlage zum Stringersystem. Um hier reproduzierbare Ergebnisse zu bekommen, sind weiterreichende Versuche und Modifikationen am Testsystem in der Zukunft erforderlich. Ein Abschluss der Versuche ist hier vor Ende 2007 nicht zu erwarten.

Nach dem Aufbringen der Hautlagen ist der Preformprozess abgeschlossen. Es folgt nun das Aufbringen des Kittbandes mittels eines Abrollers.

Der verwendete Siegelband-Abroller ist in Abbildung 3-26 dargestellt.

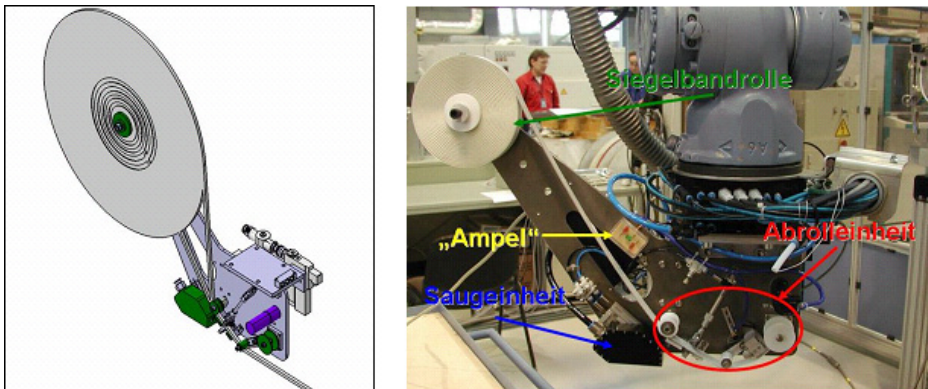


Abbildung 3-26: Siegelband-Abroller /13/

Neben den erzielbaren Legegeschwindigkeiten und dem zulässigen Legeradius ist die Stossform zum Anfang und Ende des Ablegeprozesses (siehe Abbildung 3-27) ein prozessbestimmender Vorgang.

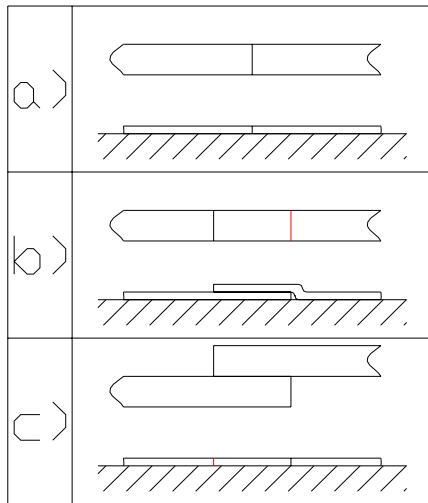


Abbildung 3-27: Darstellung der möglichen Stossformen /13/

Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Lösungen:

- a) stumpfer Stoß der beiden Enden ohne Überlappungen,
- b) überlappender Stoß der beiden Enden,
- c) nebeneinander liegende Enden mit seitlicher Berührung.

Innerhalb der durchgeführten Versuchsreihen und der Ergebnisanalyse stellte Variante b) die sicherste Prozesslösung dar. Die Legetoleranzen können ein spaltfreies Ablegen mit Längs- oder Querstoß nicht sicherstellen, während ein Verpressen der doppelten Dichtbandstärke ohne weiteres möglich ist. Abbildung 3-28 zeigt den automatischen Ablegeprozess.

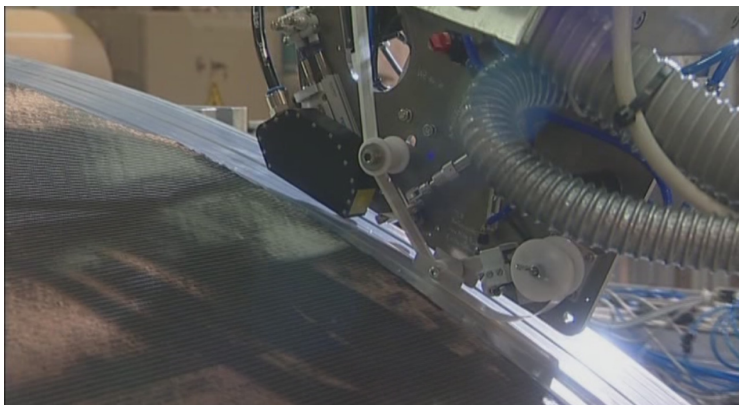


Abbildung 3-28: Aufbringen des Kittbandes /13/

Nach dem Aufbringen des Kittbandes fährt der Positionierträger aus der automatischen Fertigungszelle unter die Aushärtevorrichtung. Abbildung 3-29 zeigt die komplette Prozessdarstellung.

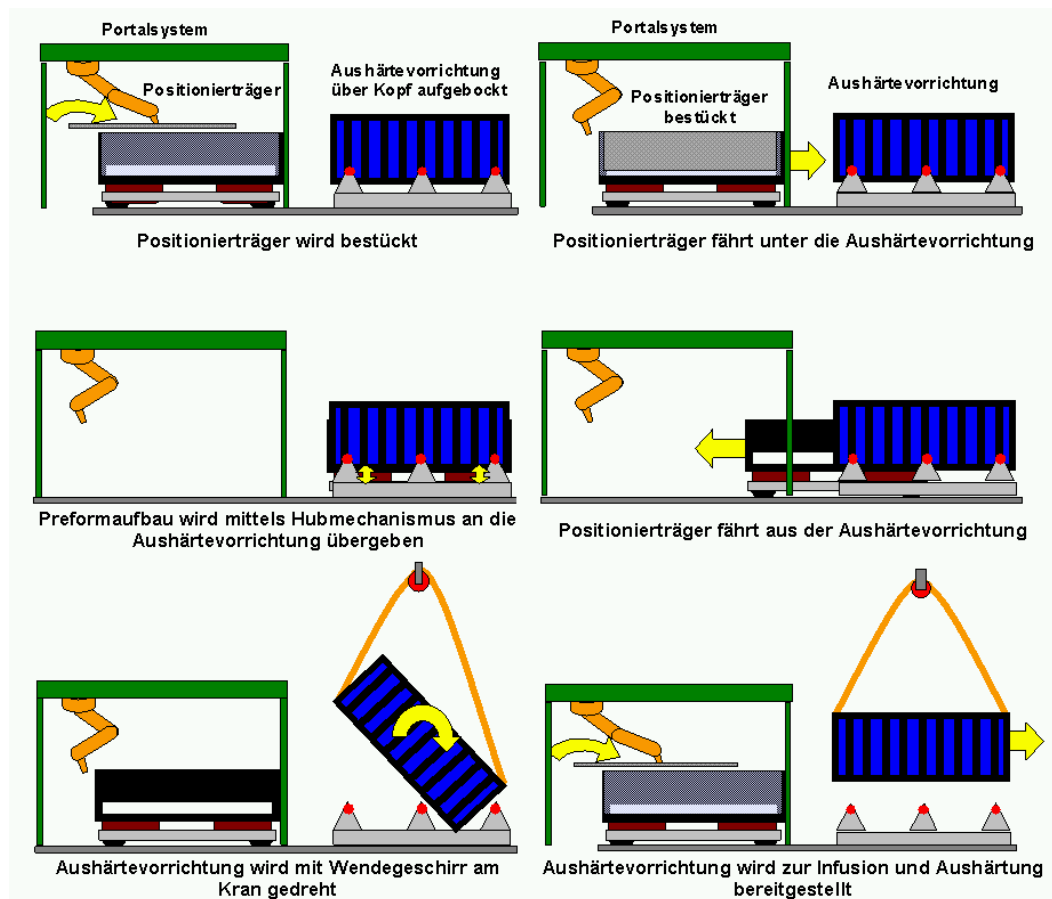


Abbildung 3-29: Prozessdarstellung Demonstratorschalenfertigung /13/

Mit Abschluss des Transfers unter die Aushärtevorrichtung wird der Preformaufbau mittels eines Hubmechanismus an die Aushärtevorrichtung übergeben. Der abgedichtete Zwischenraum zwischen Aushärtevorrichtung und Vakuumfolie wird evakuiert und das Vakuum am Positionierträger belüftet. Damit ist der Übergabeprozess abgeschlossen und der Positionierträger fährt aus der Aushärtevorrichtung und steht sofort einer Neubeschickung zur Verfügung. Im Anschluss wird die Aushärtevorrichtung mittels eines Wendegeschirrs gewendet und die Zuführung zum Autoklaven, in dem die Infusion und Aushärtung der Preform stattfindet, folgt. Nach dem Autoklavprozess werden Vakuumfolie und Hilfsstoffe entfernt und das Bauteil aus der vorher mit Trennmittel beschichteten Form entnommen. Abbildung 3-30 zeigt das fertige Bauteil, welches entsprechend der Qualitätslage und der vorgestellten Prozesskette den Nachweis eines durchgängigen, vollständigen Automatisierungskonzeptes aufzeigt.



Abbildung 3-30: Fertiges Rumpfschalenbauteil /13/

3.2.3 Auto-RTM – Automatisierung der RTM-Fertigung

Das Auto-RTM-Verfahren resultiert aus einem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben /14/ mit dem Thema „Neue Technologien für die automatisierte RTM-Fertigung zur Herstellung von CFK-Strukturen in großen Stückzahlen“.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung von automatisierten Technologien zur Herstellung von hochwertigen CFK-Bauteilen in Stückzahlen bis 20.000 pro Jahr.

Auf Basis des RTM-Verfahrens ist eine automatisierte Prozesskette zu entwickeln, die unter Berücksichtigung textiler Vorformlinge kurze Taktzeiten zulässt.

Das **Resin-Transfer-Moulding** (RTM³¹) gehört zu den Verfahren des Liquid Composite Moulding (LCM) /10/.

Die Vorteile des Verfahrens wie

- alle Bauteilseiten besitzen eine hohe Oberflächengüte,
- endkonturnahe Geometrie,
- hohe Reproduzierbarkeit sowie
- geringe Stückkosten

sind wichtiger Bestandteil der Produktionsentscheidung.

Die Nachteile wie

- hohe Investitionskosten sowie
- keine negativen Krümmungen am Bauteil

sollten ebenfalls Berücksichtigung finden.

³¹ RTM: Das Spritzpressen oder auch Resin Transfer Moulding (RTM) ist ein Verfahren zur Herstellung von Formteilen aus Duroplasten und Elastomeren.

Im Airbus-Werk Stade werden heute RTM-Bauteile nach dem Stand der Technik gefertigt. Der Ablauf lässt sich nach Abbildung 3-31 beschreiben.

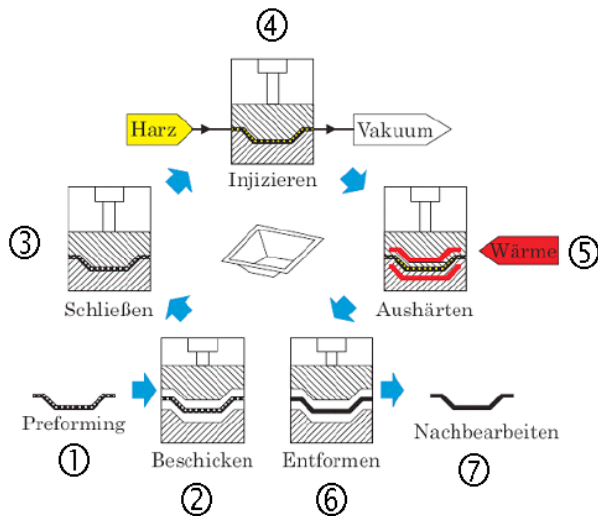


Abbildung 3-31: Herstellungsschritte des RTM-Verfahrens /14/

Schritt 1: Preforming

Das Preforming wird zum Einen eingesetzt, um die Belegungszeiten der Vorrichtung zu minimieren und zum Anderen, um die Verstärkungsfasern vorzuformen, damit diese faltenfrei und ohne Einklemmen der Fasern endkonturnah in die Formkavität abgelegt werden können. Für das Preforming wird im Werk Stade eine Thermofixierung bei 60°C bis 90°C unter Vakuum eingesetzt /8/.

Schritt 2: Beschicken

Vor dem Beschicken des Preforms (Abbildung 3-32) muss die Vorrichtung gereinigt und mit Trennmittel beschichtet werden. Die metallischen Werkzeuge mit polierten Oberflächen beeinflussen maßgeblich die Oberflächenqualität.

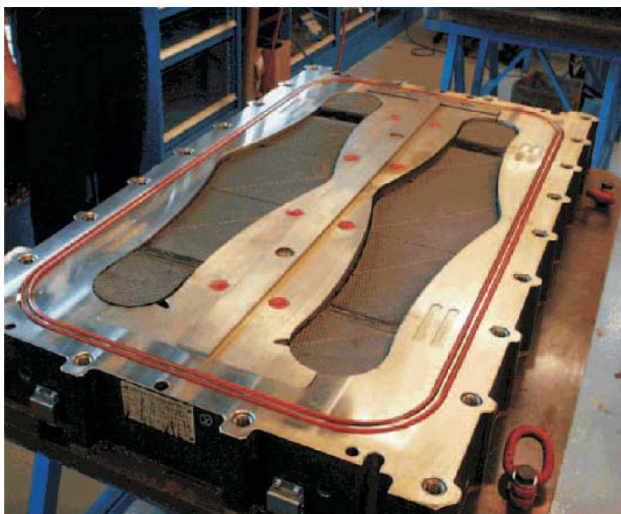


Abbildung 3-32: Belegte RTM-Form; hier: Höhenleitwerksschwinge eines Airbus A340 /14/

Schritt 3: Werkzeug schließen

Nach dem Bestücken des Werkzeuges wird dieses über Form- und Führungselemente kantfrei geschlossen. Der Schließprozess kann über Verschraubungen oder andere Elemente vorgenommen werden. Wichtig dabei ist, dass die Schließkraft größer als die Injektionskraft des Harzes ist.

Schritt 4: Injizieren:

Für das Injizieren des Harzes wird die Vorrichtung an Vakuum und an das Drucksystem angeschlossen. Gleichzeitig wird das Werkzeug auf 145°C im Ofen vorgeheizt.

Das Harzsystem, vorliegend als Ein- oder Mehrkomponentensystem, wird dann in vorge-mischtem Zustand bei ca. 6 bar Druck in die Formkavität injiziert.

Wichtig ist dabei, dass sich eine gleichmäßige Harzfront ausbildet und sich keine eingeschlossenen Luftblasen bilden können. Deshalb kommt der Lage des Angusspunktes und der Entlüftung eine zentrale Bedeutung zu.

Nach dem Füllen der Kavität und dem Schließen der letzten Entlüftung über die Harzfalle (siehe Abbildung 3-33) wird die Ofentemperatur auf 180°C erhöht.

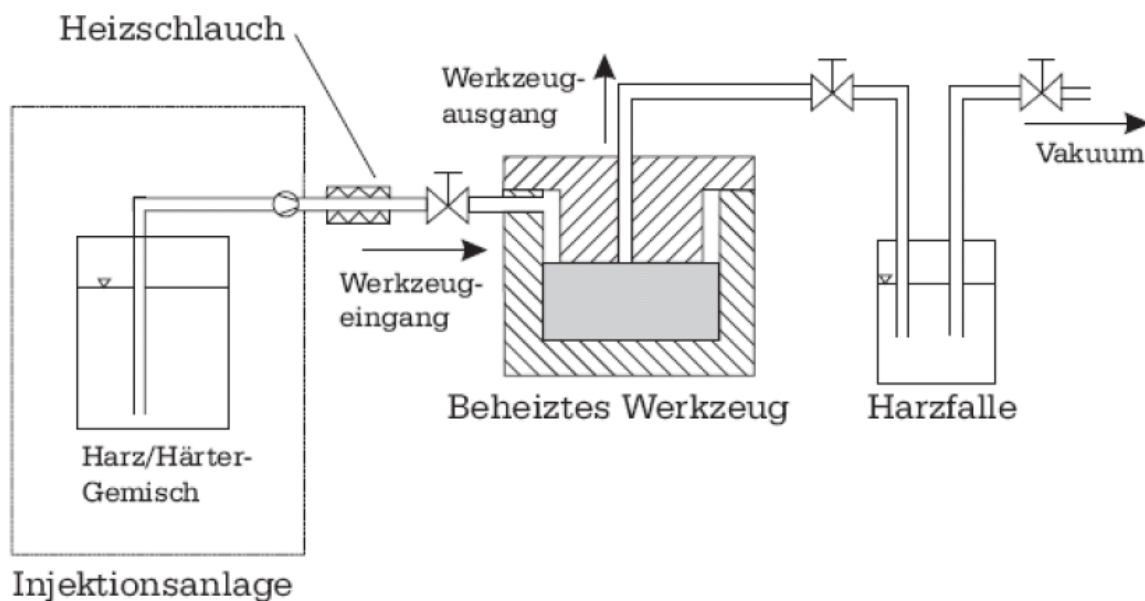


Abbildung 3-33: Prinzipskizze eines RTM-Aufbaus /14/

Schritt 5: Aushärten

Der Aushärteprozess oder auch Vernetzungsprozess genannt, beginnt mit der Temperaturerhöhung und Verweildauer im Ofen (Abbildung 3-34).

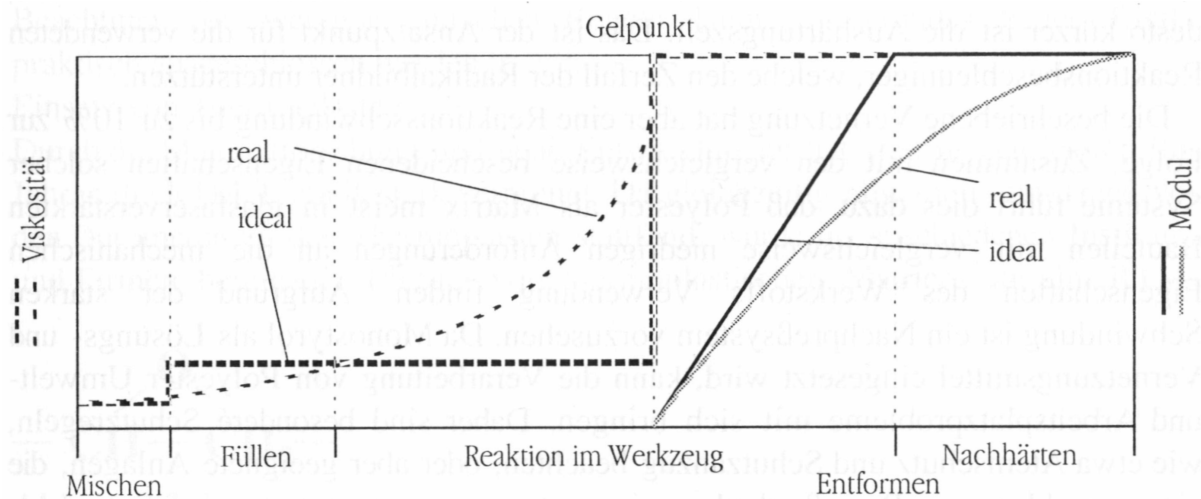


Abbildung 3-34: Aushärtungscharakteristik von RTM-Matrixsystemen /5/

Mit der Vernetzungsreaktion nimmt das Harzvolumen ab, welches unter Druck nachgeführt werden muss. Nach Ablauf der Reaktionszeit von ca. 90 Minuten wird die Vorrichtung auf Raumtemperatur abgekühlt und aus dem Ofen gefahren.

Schritt 6: Entformen

Das Öffnen der Vorrichtung bzw. das Entformen des Bauteils erfolgt in der Regel über Abdrückvorrichtungen oder mit Pressenunterstützung.

Schritt 7: Nacharbeiten

Die Nachbearbeitung der Bauteile beschränkt sich aufgrund einer konturnahen Produktion auf Entgratvorgänge, die mechanische Bearbeitung von Bohrungen oder der Aktivierung von Klebeflächen für die weitere Verwendung.

Weiterhin ist eine NDT-Prüfung im Rahmen der Nachbearbeitung einzuplanen.

3.2.3.1 Konzept der Prozesskette

Das Konzept des Projektes Auto-RTM basiert auf der hochautomatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen bis zu 20.000 Einheiten pro Jahr. Für die Umsetzung wird der Seitenleitwerksbeschlag des Airbus-Werkes Stade gewählt.

Grundlage der Prozesskette ist das in Abbildung 3-35 dargestellte Prozessschaubild.

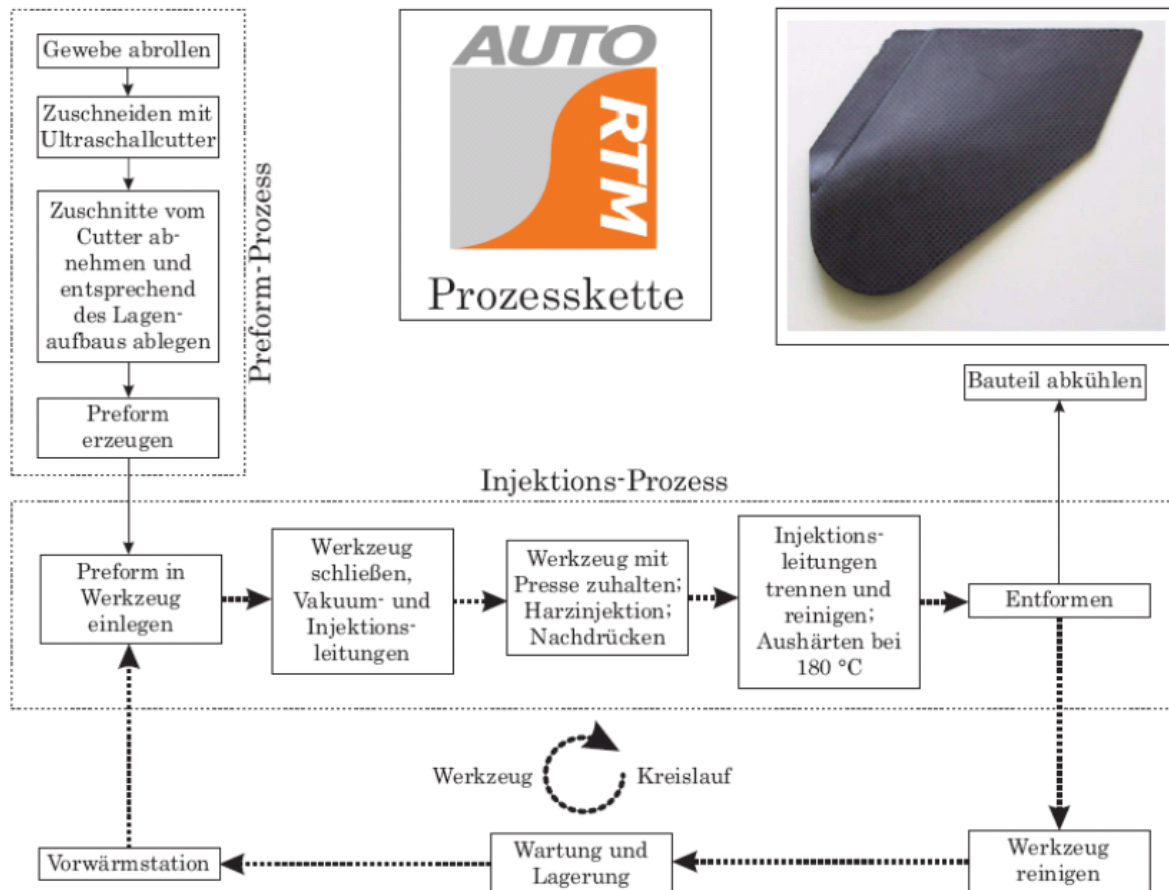


Abbildung 3-35: Übersicht über die RTM-Prozesskette /14/

Die aufgeführten einzelnen Prozessschritte sind dabei den zwei Basisfunktionen

- dem Preform-Prozess und
- dem Injektions-Prozess

zugeordnet.

Das gewählte Konzept beinhaltet alle Funktionen, um eine umfassende Automatisierung abbilden zu können.

Insbesondere die manuellen Prozessabläufe in der heutigen Produktion sollten im Konzept analysiert und automatisiert werden.

Das gewählte Bauteil, ein Seitenleitwerksbeschlag eines Single-Aisle³²-Seitenleitwerks, misst ca. 400x200 mm mit variierender Wandstärke von 1 mm auf 15 mm.

Entsprechend Abbildung 3-36 wird der SLW-Beschlag als Längskraftbeschlag in sechs verschiedenen Formen zu jeweils drei Beschlägen zusammengesetzt und mit der Haut ausgehärtet.

³² Als Single-Aisle-Flugzeuge werden alle Airbus-Flugzeuge der A320-Familie bezeichnet.

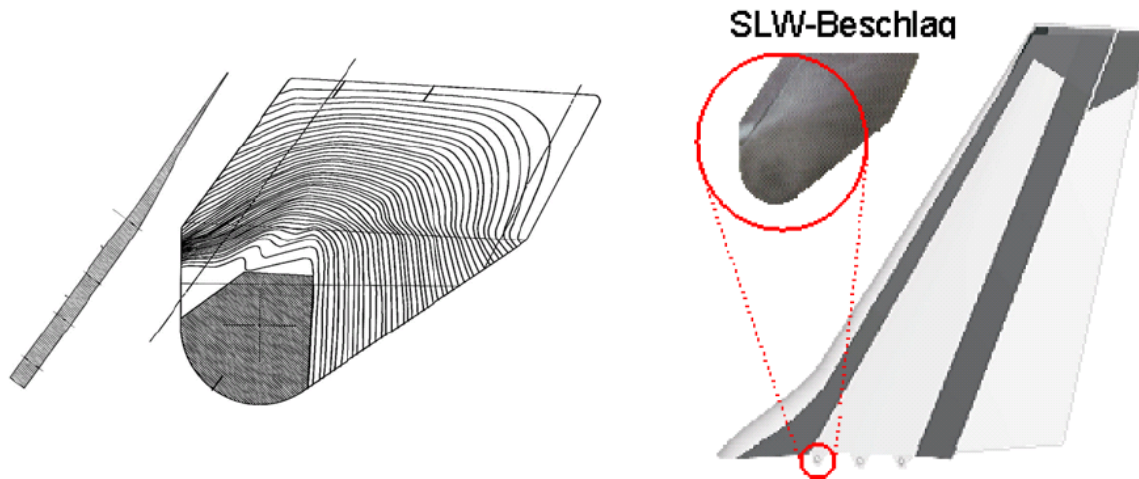


Abbildung 3-36: Skizze sowie Lage des Demonstratorbauteils /14/

Aufgrund der Dickenvarianz von 0,5mm - 15mm ergibt sich eine Vielzahl von Einzellagen, die sicher geschnitten, transportiert und positioniert werden müssen.

Abgeleitet aus dem Prozessbild wurde in Anlehnung an den Flächenbedarf eine Versuchsanlage nach Abbildung 3-37 im Technologiezentrum der CTC GmbH aufgebaut.



Abbildung 3-37: Versuchsanlage im Technologiezentrum der CTC GmbH /14/

Entsprechend dem Anlagenkonzept beginnt der Prozess mit dem Schneiden der einzelnen textilen Zuschnitte durch einen Ultraschallcutter. Danach übernimmt der Handhabungsroboter, ausgerüstet mit einem speziellen Effektor, die Zuschnitte vom Tisch, ohne dabei den umliegenden Faserverschnitt oder andere Zuschnitte mit anzuheben, in die Preform.

Nach dem Einlegen aller Faserzuschnitte wird über den eingebrachten Binder und das Mikrowellenpreforming der Preform erzeugt, mittels eines Transferroboter aus dem Werkzeug entnommen und dem Aushärtewerkzeug zugeführt.

Damit beginnt der zweite Zyklus, das Injizieren und Aushärten in der RTM-Press sowie der Transport zur Entnahmestation. Hier übernimmt wiederum ein Roboter die Entnahme des Bauteils und die Reinigung des Werkzeuges.

3.2.3.2 Automatisierung der einzelnen Herstellungsschritte

Im Nachfolgenden soll nun das Konzept (Abbildung 3-38) vorgestellt und in den wichtigsten Punkten mit der vorhandenen Serienfertigung verglichen werden.

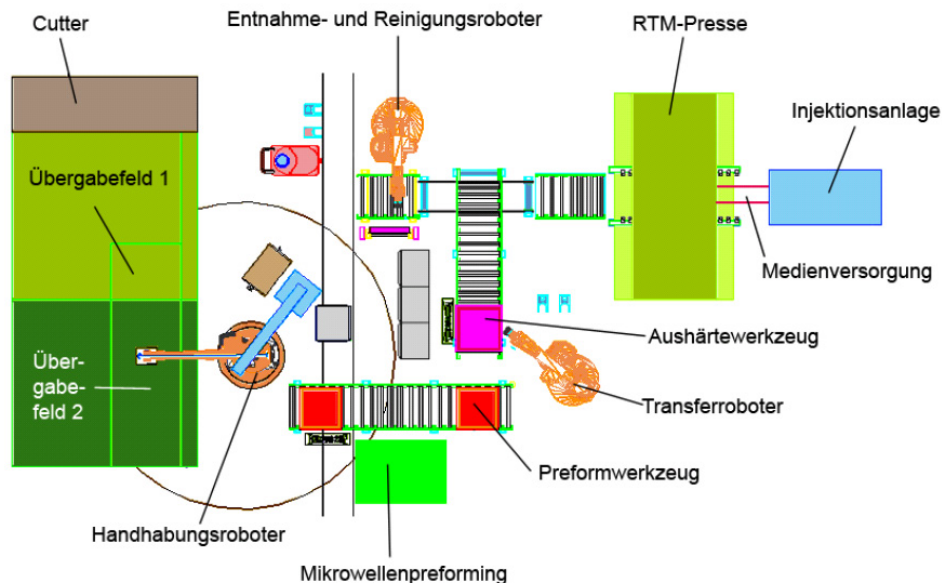


Abbildung 3-38: Auto-RTM Versuchsanlage /14/

Der Fertigungsprozess beginnt mit dem Cutter der Firma Humantec/Lectra bzw. den drei Hauptgruppen (Feeder, Zuschnittstisch und Abräumbereich).

Abbildung 3-39 zeigt den Cuttertisch. Der Feeder übernimmt die Zuführung des zu schneidenden Faserhalbzeuges; er ist mit einer Kantensteuerung ausgestattet und ermöglicht somit eine geradlinige Ausrichtung des Halbzeuges.

Dies ist notwendig, um eine exakte Ausrichtung der Kohlenstofffaser in den Zuschnitten zu gewährleisten. Der nachfolgende Schneidbereich des Cutters beträgt $2700 \times 3000 \text{ mm}^2$, er ist ausgerüstet mit einem luftdurchlässigen Transportband, welches während des Schneidvorgangs unter Vakuum gesetzt wird. Ohne die Fixierung würde das zu schneidende Material verrutschen und die Kohlenstofffaserzuschnitte könnten nicht passgenau gefertigt werden. Das eigentliche Schneiden / Trennen des Materials erfolgt mit Hilfe einer Verfahrbrücke mit integriertem Werkzeughalter.



Abbildung 3-39: Cutter-Tisch /14/

Der Werkzeughalter kann dabei unterschiedliche Messer aufnehmen und diese um mehr als 360° drehen. Für das Schneiden der Gewebe bzw. Gelege kann sowohl ein Ziehmesser als auch oszillierendes Messer eingesetzt werden. Das oszillierende Messer führt ca. 18.000 Hübe pro Minute in senkrechter Richtung zur Faser durch.

Als Besonderheit der gewählten Anlage können sogenannte Over- und Heelcuts vorgenommen werden. Beim Overcut werden die Ecken überschritten, beim Heelcut wird der Anschnitt einer Ecke überschritten. Dies gewährleistet eine vollständige Trennung des Materials und ist damit Voraussetzung einer automatisierten Materialabnahme mittels Roboters.

Nach dem Schneiden der Materialien wird das Transportband weiter zum Abräumtisch getaktet. Auf dieser 2.700 x 3.000 mm² großen Fläche werden die Zuschnitte vom Kommissionierroboter abgenommen. Das übriggebliebene Restmaterial wird beim nächsten Transport des Förderbandes entsorgt.

Der speziell entwickelte Greifer bzw. Handhabungseffektor bekommt seine genaue Position über eine Tabelle des zentralen Rechners mitgeteilt.

Entsprechend Abbildung 3-40 übernimmt der Greifer die einzelnen Zuschnitte vom Ablegetisch.

Bedingt durch die geringen Haltekräfte und einer vorläufigen Umformung der Zuschnitte am Handhabungseffektor können die Lagen exakt aufeinander in das Preformwerkzeug gestapelt werden.

Zuschnittsverluste beim Transport werden über einen Reflexionstaster abgesichert.

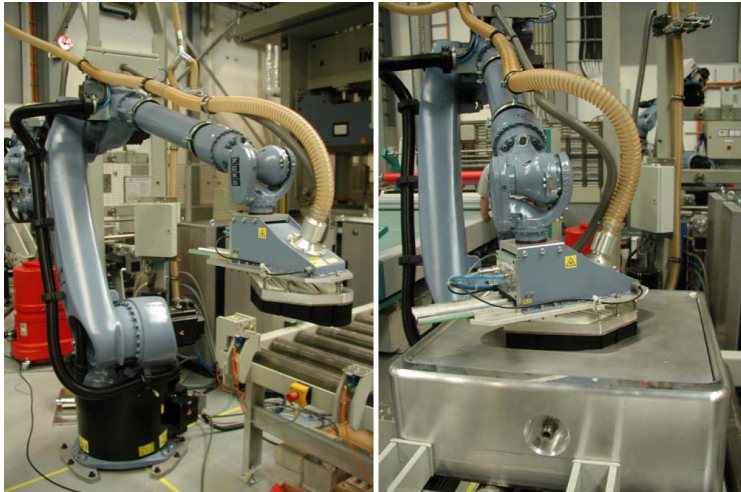


Abbildung 3-40: Kommissionierroboter /14/

Eine der speziellen Herausforderungen im Projekt war die Entwicklung eines flexiblen Effektors, um die CFK-Zuschnitte ohne Beschädigung, Verschiebung von einzelnen Fasern und Verunreinigungen der Kohlenstofffaserzuschnitte transportieren zu können.

Dies wurde mit der Patentanmeldung (05HH142) erreicht.

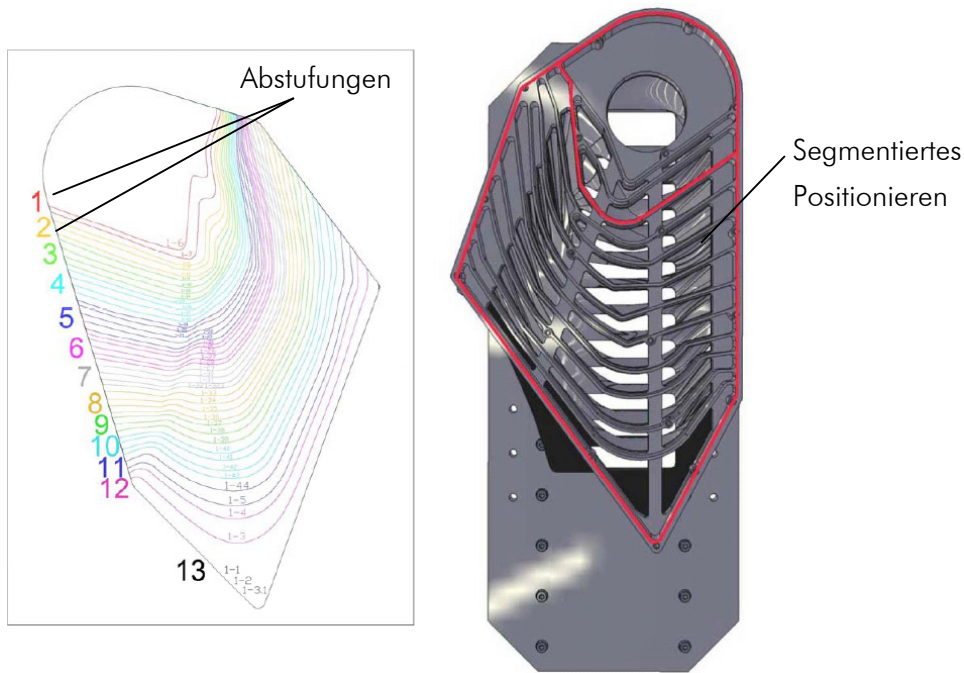


Abbildung 3-41: Aufbau des Endeffektors /14/

Gemäß Abbildung 3-41 wird dieses Ziel durch ein variabel ansteuerbares Kammersystem mittels eines verstellbaren Schiebers erreicht.

Die im SLW-Beschlag vorhandenen 46 verschiedenen Größen werden somit über den Effektor und einen extern vorhandenen Verdichter, der mittels Frequenzumrichter und Drehsensor den gewünschten Volumenstrom und Unterdruck zur Verfügung stellt, sicher transportiert.

Neben dem Transportkonzept gibt es im Projekt ein weiteres Handlingproblem zu lösen, das Verformen oder Umformen der Zuschnitte nach Abbildung 3-42, um einen Überhang im Preformwerkzeug zu vermeiden.

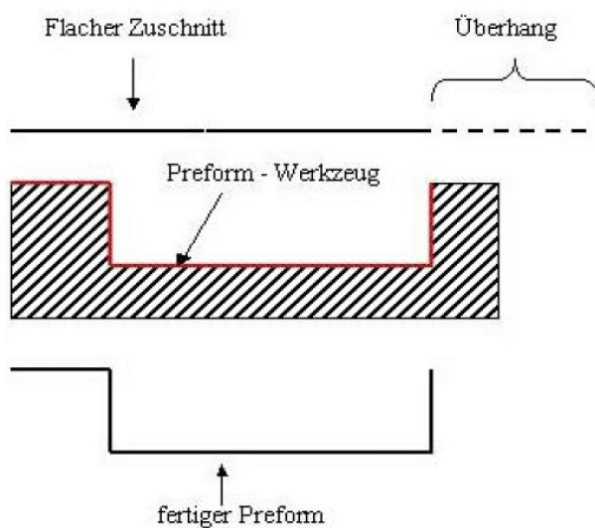


Abbildung 3-42: Umformproblematik beim Einlegen der Zuschnitte /14/

Durch die spezielle Kontur des Endeffektors (Abbildung 3-43) konnte bereits beim Aufnehmen vom Cuttertisch eine zuverlässige Umformung der Zuschnitte und damit ein einwandfreies Ablegen in der Werkzeugform erreicht werden.



Abbildung 3-43: Ablegen der Zuschnitte in das Preformwerkzeug /14/

Nach dem Einlegen der Zuschnitte in die Werkzeugform muss diese zu den nächsten Bearbeitungsstationen transportiert werden. Hierzu wurde ein eigenes Transportsystem entwickelt.

Bei den gemäß Abbildung 3-44 entwickelten Systemen handelt es sich um kombinierte Rollen- und Kettenförderer sowie einen integrierten Scherenhubtisch für die Zu- und Abführung zur Presse.

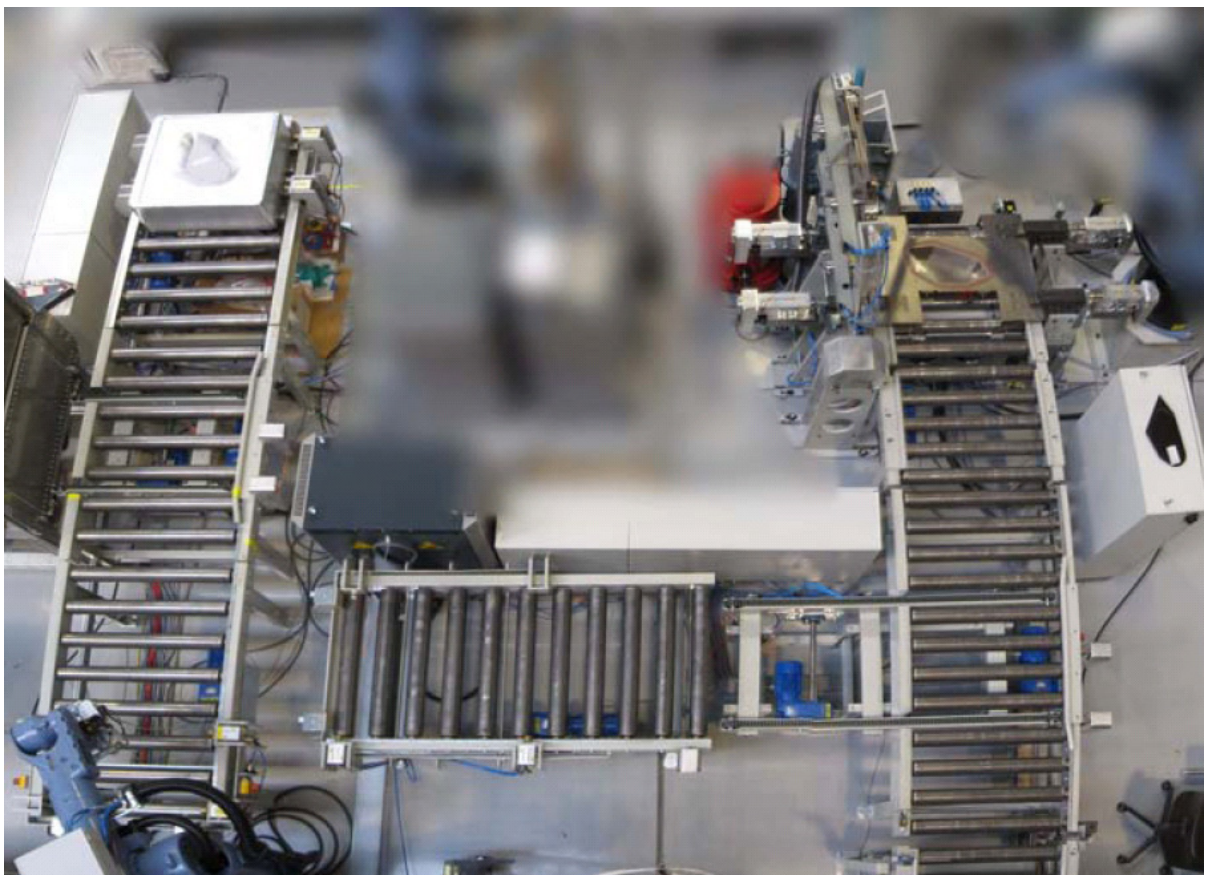


Abbildung 3-44: Transportsystem /14/

Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Funktionen, die dem Stand der Technik entsprechen, soll in dieser Arbeit verzichtet werden.

Im nächsten Prozessschritt werden die einzelnen Zuschnitte in der Werkzeugform zu einem Preformling geformt. Hierzu werden die trockenen, mit Binder beschichteten Kohlenstofffasern mit Temperatur und Druck beaufschlagt. Dieser Vorgang sorgt für eine bessere Bauteilqualität und verkürzt die Belegungszeiten der Werkzeuge.

Unter der Prämisse „Reduzierung der Prozesszeiten um 50%“, d.h. inklusive Aufheiz- und Haltezeit von heute 35 Minuten auf 18 Minuten, wurde ein Konzept basierend auf der Mikrowellentechnik entwickelt, beschafft und in Betrieb genommen.

Durch eine geeignete Leistung in Kombination mit einer angepassten Strahlenführung (Magnetrons sowohl an der Anlagenober- als auch der -unterseite) und mikrowellentransparenten Formwerkzeugen ist es möglich, die Energieeinbringungsrate/-effizienz drastisch zu erhöhen. /14/ Dazu wurde die in Abbildung 3-45 dargestellte Anlage geliefert und eingefahren.

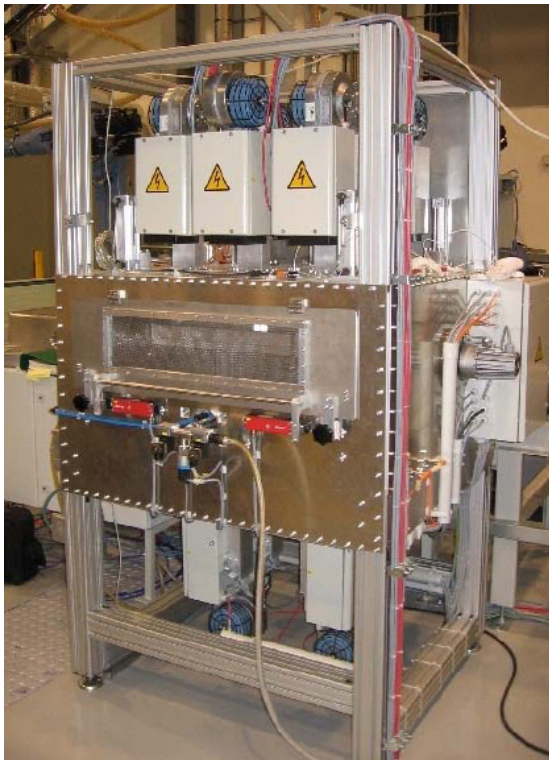


Abbildung 3-45: Preform-Anlage (Vorderseite/Rückseite) und Preform-Werkzeug /14/

Abbildung 3-46 zeigt schematisch das dabei verwendete Werkzeugkonzept. Das mehrteilige Werkzeug besteht aus einer Kombination von Mikrowellen-transparenten und Mikrowellen-undurchlässigen Materialien (Metallen). Auf diese Weise ist es möglich, die Mikrowellenleistung allseitig direkt in das Bauteil einzuführen.

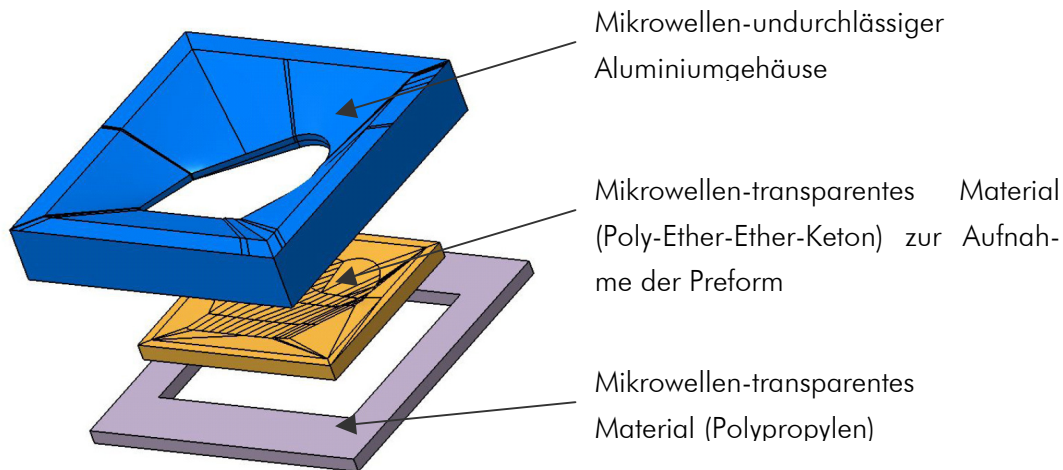


Abbildung 3-46: Werkzeugkonzept /14/

Das mit diesem Verfahren eine Halbierung und damit Einhaltung der Vorgabe möglich ist, zeigt Abbildung 3-47.

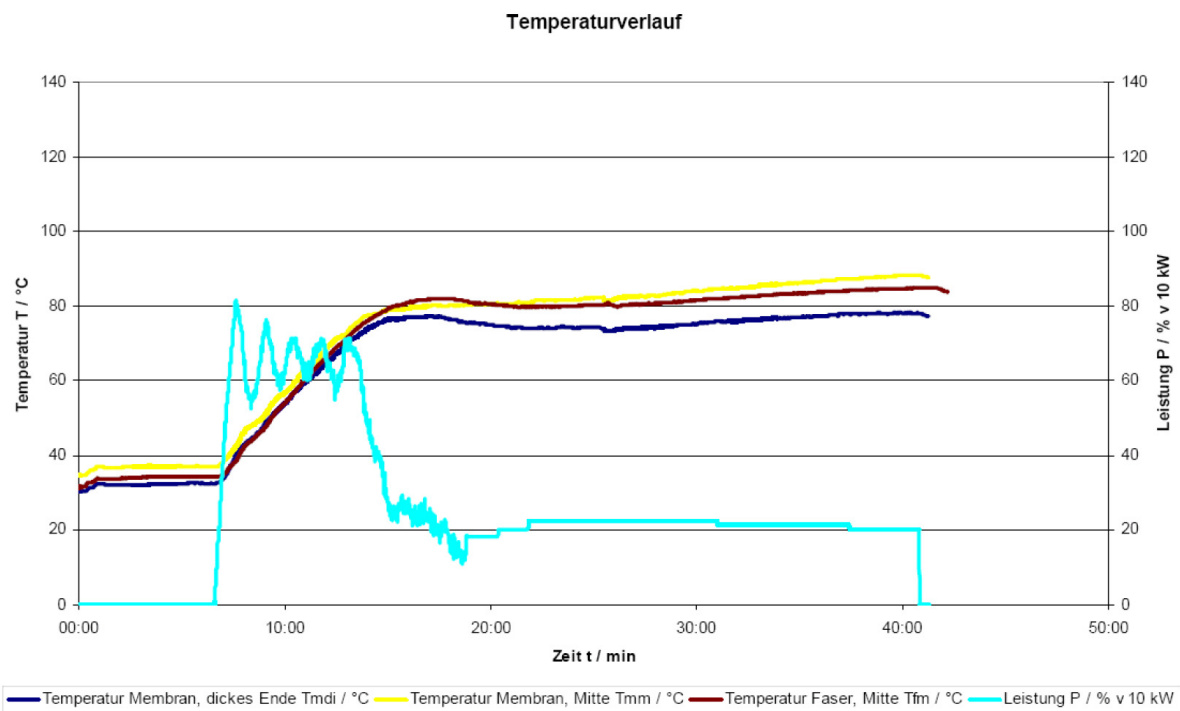


Abbildung 3-47: Temperaturverlauf und Leistung während des Preform-Prozess /14/

Aus der Aufzeichnung ist zu erkennen, dass die geforderte Preformtemperatur von 80°C nach ca. 17 min erreicht ist, ohne dabei die gesamte Leistungsreserve der Anlage auszuschöpfen, weiteres Optimierungspotenzial ist noch vorhanden.

Mit dem Abschluss des Preformprozesses und dem Transfer des Preforms mittels Roboter in das RTM-Werkzeug beginnt der eigentliche Bauteilherstellungsprozess.

Nach heutigem Stand der Technik sind dazu ein mehrteiliges Metallwerkzeug sowie ein Heißluftofen für den Wärmeübergang erforderlich. Abbildung 3-48 zeigt einen typischen Temperaturverlauf im Luftumwälzofen. Aufgrund von manuellen Verschraubungen der

Entsprechend Abbildung 3-50 wurde deshalb ein Konzept mit folgenden Randbedingungen erarbeitet:

- zweiteiliges Werkzeug zur Automatisierung der Auf- und Schließbewegung,
- Integration von seitlichen Transportleisten,
- Schließ-, Halte- und Öffnungsprozess über eine hydraulische Presse,
- Wärmeübertragung über direkte Wärmeleitung mittels Presse,
- automatisierbarer Anguss- und Absaugungsprozess.

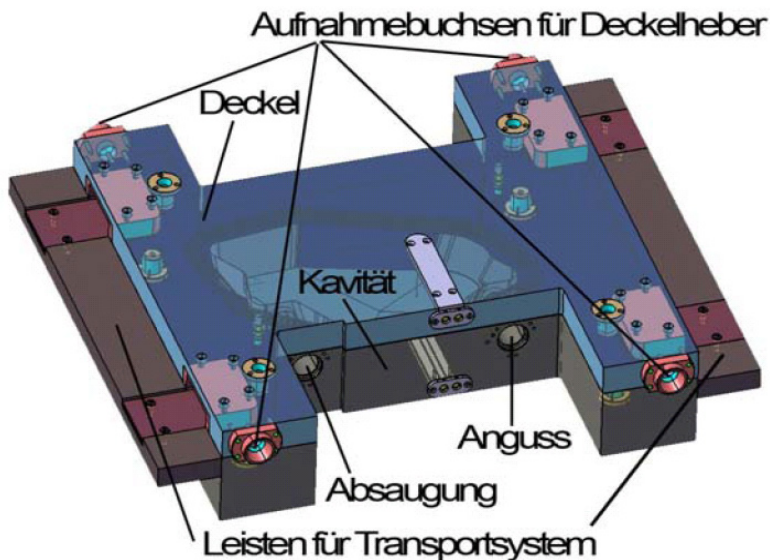


Abbildung 3-50: Auto-RTM-Werkzeugkonzept /14/

Abbildung 3-51 zeigt das reale RTM-Werkzeug im Funktionstest.



Abbildung 3-51: Auto-RTM-Werkzeug

Mit dem Einfahren des RTM-Werkzeuges in die hydraulische Heizpresse beginnt ein weiterer kritischer Abschnitt des RTM-Prozesses, der im Rahmen des Technologieprojektes näher analysiert wurde: der Harzinjektionsprozess.

Hauptbestandteile der Untersuchung waren die

- Harzinjektionsanlage und die
- Technologie der Medienver- und -entsorgung.

Das gemäß Abbildung 3-52 dargestellte Funktionsprinzip basiert auf einer Injektionsanlage, die nach heutigem Stand der Technik über eine Vorwärmung des Harzes im Ofen stattfindet.

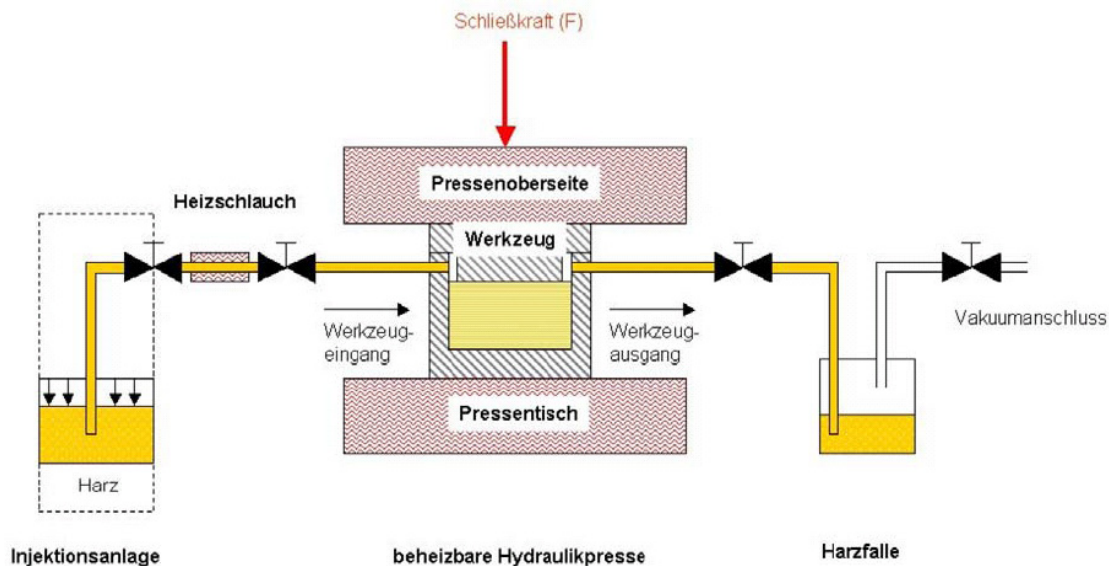


Abbildung 3-52: Schematischer Aufbau RTM-Heizpresse /14/

Dieser Prozess ist aufgrund der geringen Wärmeleitung des Harzes sehr zeitaufwendig und führt zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung im Harzgebilde /14/ (siehe hierzu auch Abbildung 3-53).

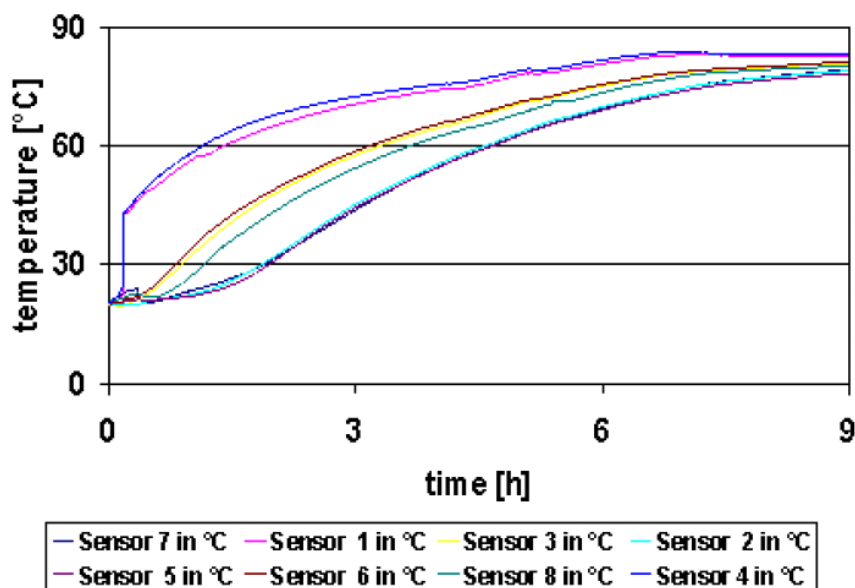


Abbildung 3-53: Temperaturverteilung beim Erwärmen von Harz im Ofen /14/

Des Weiteren ist nach der Erwärmung ein Umfüllprozess vom Ofengefäß in die Injektionsanlage erforderlich.

In Zusammenarbeit mit dem DLR wurde aus diesem Grund ein Verfahren spezifiziert und erfolgreich erprobt: die Harzerwärmung mittels Mikrowellenstrahlung. Abbildung 3-54 zeigt den Funktionsaufbau der Mikrowellenerwärmungskammer sowie entsprechend Abbildung 3-55 die reale Anlage mit Harzinjektionsanlage und automatischer Harzfalle.

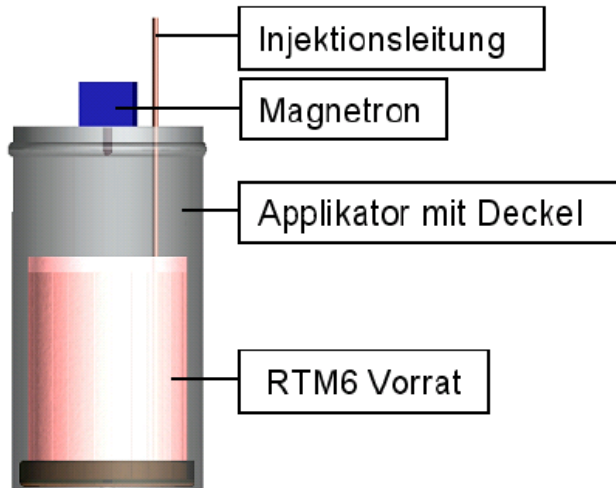


Abbildung 3-54: Mikrowellenerwärmungskammer /14/



Abbildung 3-55: Harzinjektionsanlage mit Mikrowellenerwärmung und automatische Harzfalle /14/

Spezielles Augenmerk wurde dabei auf ein homogenes Erwärmen des Harzes, Vermeiden des anschließenden Umfüllens und eine drastische Reduktion der Aufwärmzeit gelegt.

Abbildung 3-56 zeigt die Temperaturverteilung beim Erwärmen des Harzes.

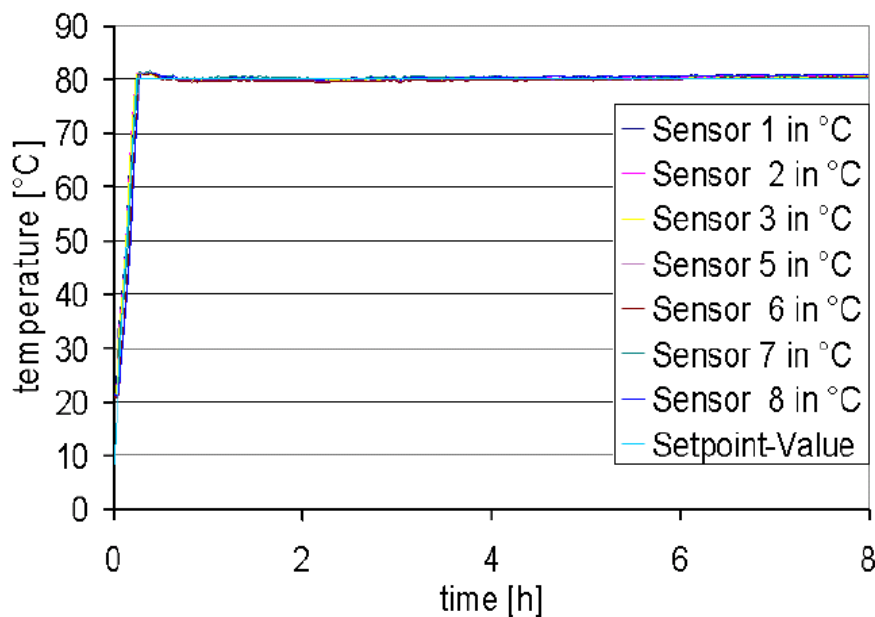


Abbildung 3-56: Temperaturverteilung beim Erwärmen von Harz in der Mikrowellen-Injektionsanlage /14/

Es konnte dabei eine um den Faktor 5 geringere Aufheizzeit sowie eine feinfühligere Regelung des Prozesses (zur Vermeidung von Hot-Spots) und eine ausreichende Prozesssicherheit (speziell gegenüber exothermer Reaktionen) sicher umgesetzt werden. /14/

Ein weiterer, bereits angedeuteter Schwerpunkt im RTM-Prozess ist die Medienversorgung bzw. die Kupplungsproblematik.

Der kritische Punkt ist, dass beim An- und Abkuppeln zwischen den Schnittstellen Werkzeug/ Harzleitung und Harzleitung / Injektionsanlage eine saubere Dichtfläche zur Verfügung steht, so dass keine Leckage entstehen kann und somit zusätzlicher Reinigungsaufwand vermieden wird. /14/

Ein weiteres Problem ist die Beseitigung bzw. Reinigung des überschüssigen Harzes in den Transfersystemen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden drei Systeme analysiert, die in einigen Bereichen (ARTIM³³) zur Patentanmeldung geführt haben:

- automatisch – reinigender Injektionskopf (ACE Variante),
- HC-Andock (Hot-Cold),
- ARTIM-Verfahren.

In der ACE-Variante besteht das in Abbildung 3-57 dargestellte System aus zwei baugleichen Baugruppen für die Ein- und Ausgangsseite des Werkzeuges.

³³ ARTIM (All Resin Transfer In Mould) bezeichnet ein Verfahren, dass die Kopplungs-Problematik von harzführenden Leitungen beim RTM-Prozess prinzipbedingt ausschließt.

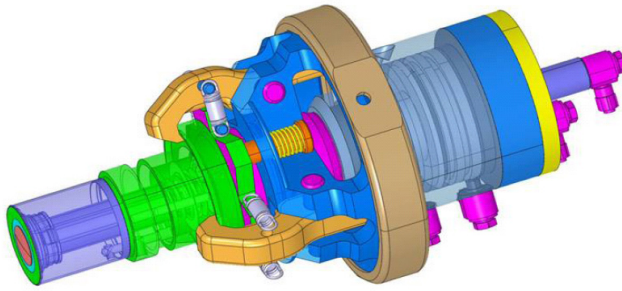


Abbildung 3-57: Injektionskopf der ACE-Variante /14/

Jede Baugruppe basiert auf einem Injektionskopf, der nur während des Injektionsvorgangs am Werkzeug angekuppelt ist, sowie dem Schließventil, welches permanent am Werkzeug montiert ist.

Abbildung 3-58 zeigt den Andockvorgang der Kopfeinheit.



Abbildung 3-58: Andockvorgang der Injektionskopfeinheit /14/

Im Praxistest konnte der automatische Injektionskopf seine Funktionsfähigkeit nachweisen. Allerdings besteht das Gesamtsystem (siehe Abbildung 3-59) aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten.

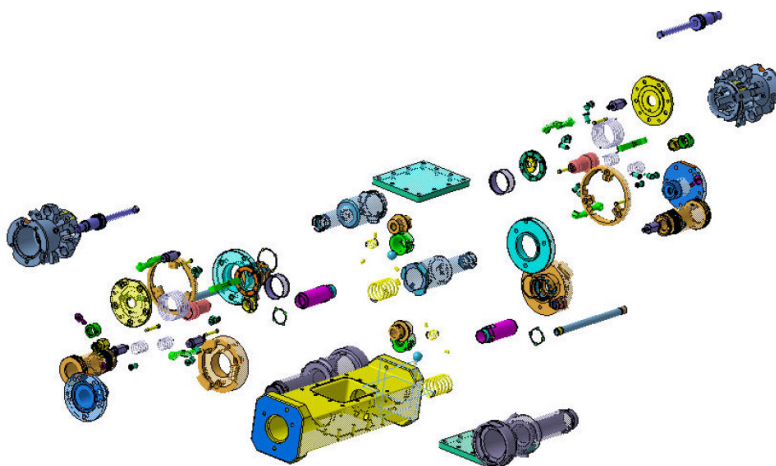


Abbildung 3-59: Einzelteile des Injektionskopf von ACE /14/

Dies wiederum führt zu hohen Aufwendungen beim Reinigen der Komponenten sowie zum Austausch einiger Einzelteile.

Bezogen auf einen Kostenaufwand von 16,- € pro RTM-Prozess ist auch bei einem identifizierten Reduzierungspotenzial von 50% dieses Verfahren nicht die optimale Lösung.

Das zweite untersuchte Verfahren, das HC-Andock (Hot-Cold)-Verfahren, basiert auf dem charakteristischen Temperaturverhalten des Harzes (siehe Abbildung 3-60).

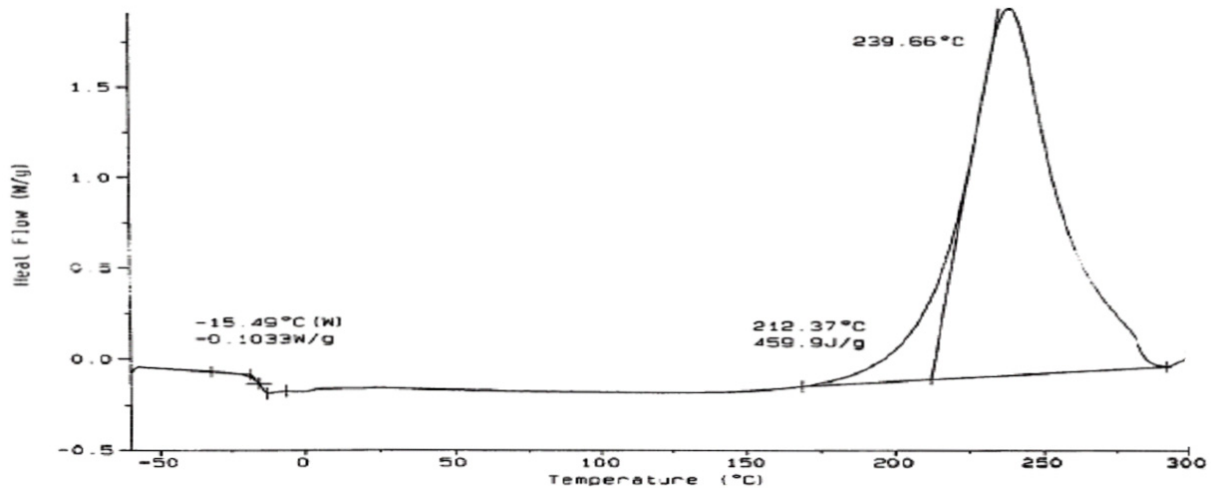


Abbildung 3-60: DSC³⁴-Kurve von unvernetztem RTM6-Harz /14/

Das Funktionsprinzip nutzt die unterschiedlichen Harzzustände über dem Temperaturverlauf, d.h. gemäß Abbildung 3-61 wird das Harz im Kupferrohr mit einer Länge von 15 cm an der Messstelle 4 eingefroren. Somit ist ein sauberes Abkoppeln, ohne dass auslaufendes Harz die Schnittstelle verunreinigt, möglich.

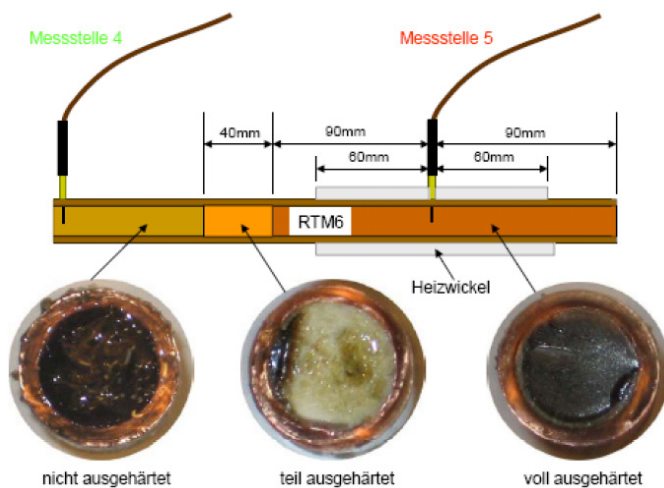


Abbildung 3-61: Aushärtungszone /14/

Diese Funktion wird auf der Austrittsseite / Werkzeugseite durch eine Erhitzung des Harzes und damit Vernetzung im Übergangsbereich Kartusche / Werkzeug erreicht.

³⁴ Die Dynamische Differenzkalorimetrie (engl.: Differential Scanning Calorimetry – DSC) ist ein Verfahren zur Messung von abgegebener/aufgenommener Wärmemenge einer Probe bei isothermer Arbeitsweise, Aufheizung oder Abkühlung.

Der entstandene Pfropfen verhindert ein Austreten des Harzes und erhält gleichzeitig den Druck im Inneren der Kavität.

Nachdem die Kartusche beidseitig geschlossen ist, wird sie entfernt und bei erneuter Injektion mit einer neuen Kartusche versorgt; dieser Prozess kann automatisiert ablaufen.

Das dritte entwickelte Verfahren, das All Resin Transfer In Mould (ARTIM) Verfahren basiert auf einer Neuentwicklung mit entsprechenden Erfindungsmeldungen. Grundidee des ARTIM-Verfahrens ist die Vermeidung der Kupplungsproblematik, d.h. der Harzvorrat als auch die Harzfalle sind im Werkzeug integriert (Abbildung 3-62).

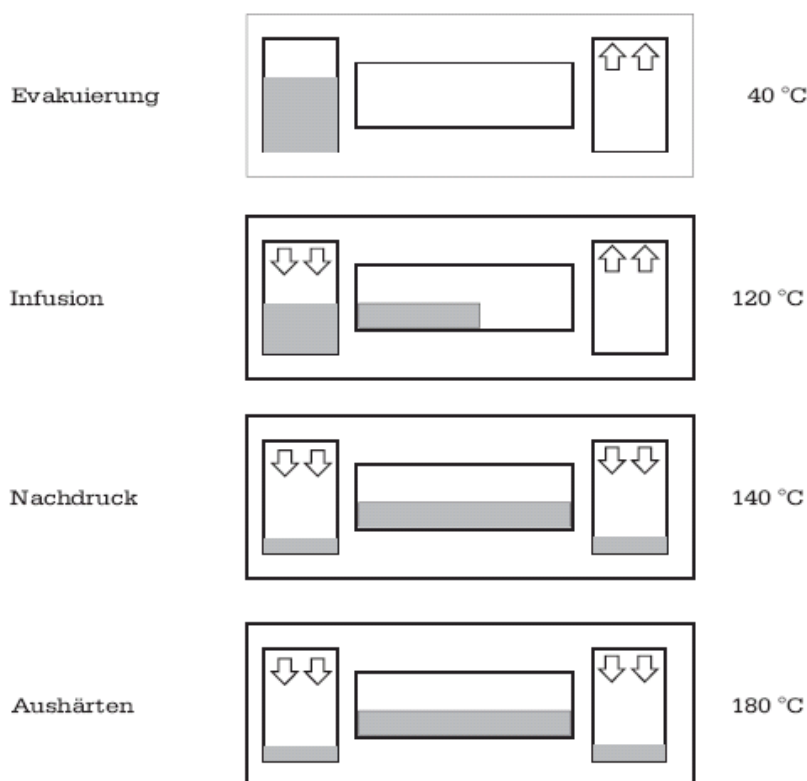


Abbildung 3-62: Funktionsprinzip ARTIM /14/

Ausgehend von der Bestückung des Werkzeugs mit dem Preform und der benötigten Harzmenge in Form eines gefrorenen Blocks oder als gefrorenes Granulat besteht der Prozess aus den vier folgenden Arbeitsschritten /14/:

- 1. Schritt: Im kalten Zustand kann aufgrund der hohen Viskosität des Harzes und einer geeigneten Gestaltung der Verbindungsleitung Vorratskammer-Bauteilkavität, die Bauteilkavität über die Harzfallenseite (rechts) evakuiert werden.
- 2. Schritt: Als Folge der Erhöhung der Temperatur von Harz und Werkzeug kann durch das anliegende Vakuum und die Beaufschlagung der Harzvorratskammer mit Überdruck (Pressluft) das Harz von der Vorratskammer in die Bauteilkavität transferiert werden. Die sich darin befindenden Fasern

werden getränkt. Ist die Kavität gefüllt, tritt das Harz in die Harzfalle ein. Ab einem bestimmten Füllstand in der Harzfalle wird nun gleichfalls diese Seite mit Druck beaufschlagt und der Harzstrom kommt zum Erliegen.

- 3. Schritt: In der Nachdruckphase (sie dient zur Verkleinerung von evtl. vorhandenen Fehlstellen in Form von Gaseinschlüssen im Bauteil) erfolgt eine Beaufschlagung mit gleichem Druck auf der Harzvorrats- und auf der Harzfallenseite. Während dieser Phase wird die Temperatur kontinuierlich bis auf die Aushärtetemperatur erhöht.
- 4. Schritt: Zur Aushärtung wird der aufgebaute Druck aufrechterhalten und die bereits erreichte Temperatur bleibt konstant.

Als einziges Kupplungselement verbleibt die Druckluftzufuhr, die automatisiert angeschlossen werden kann.

Auf Basis dieses Konzeptes wurde eine entsprechende Spezifikation erstellt und ein erstes Prototypwerkzeug konstruiert, gefertigt und getestet (Abbildung 3-63).

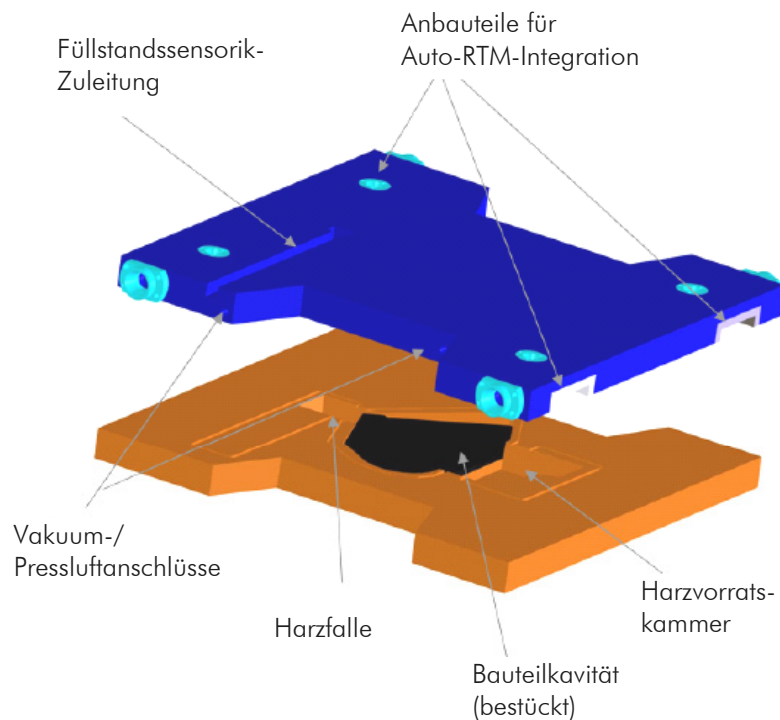


Abbildung 3-63: ARTIM-Werkzeugprototyp /14/

Es folgten reale Fertigungsversuche, siehe Abbildung 3-64, in denen erste Versuchsbauteile produziert wurden.

Die erzielten Ergebnisse bestätigen das Gesamtkonzept. Es entsteht keine Exothermie in den Kammern, die Prozessregelung erfüllt die Erwartungen, so dass bereits gute Bauteilqualitäten erreicht werden konnten.



Abbildung 3-64: ARTIM Prototyp-Werkzeug nach Herstellung eines Bauteils /14/

Nach der Modellierung und der Ermittlung der jeweiligen Herstellkosten wurde im Rahmen des Auto-RTM-Projektes auch eine Bewertung der Ergebnisse vorgenommen. In dieser Arbeit soll auf die Detaildarstellung und die zugehörige Ableitung verzichtet werden.

Das zusammenfassende Ergebnis des Variantenvergleichs zeigt Abbildung 3-65.

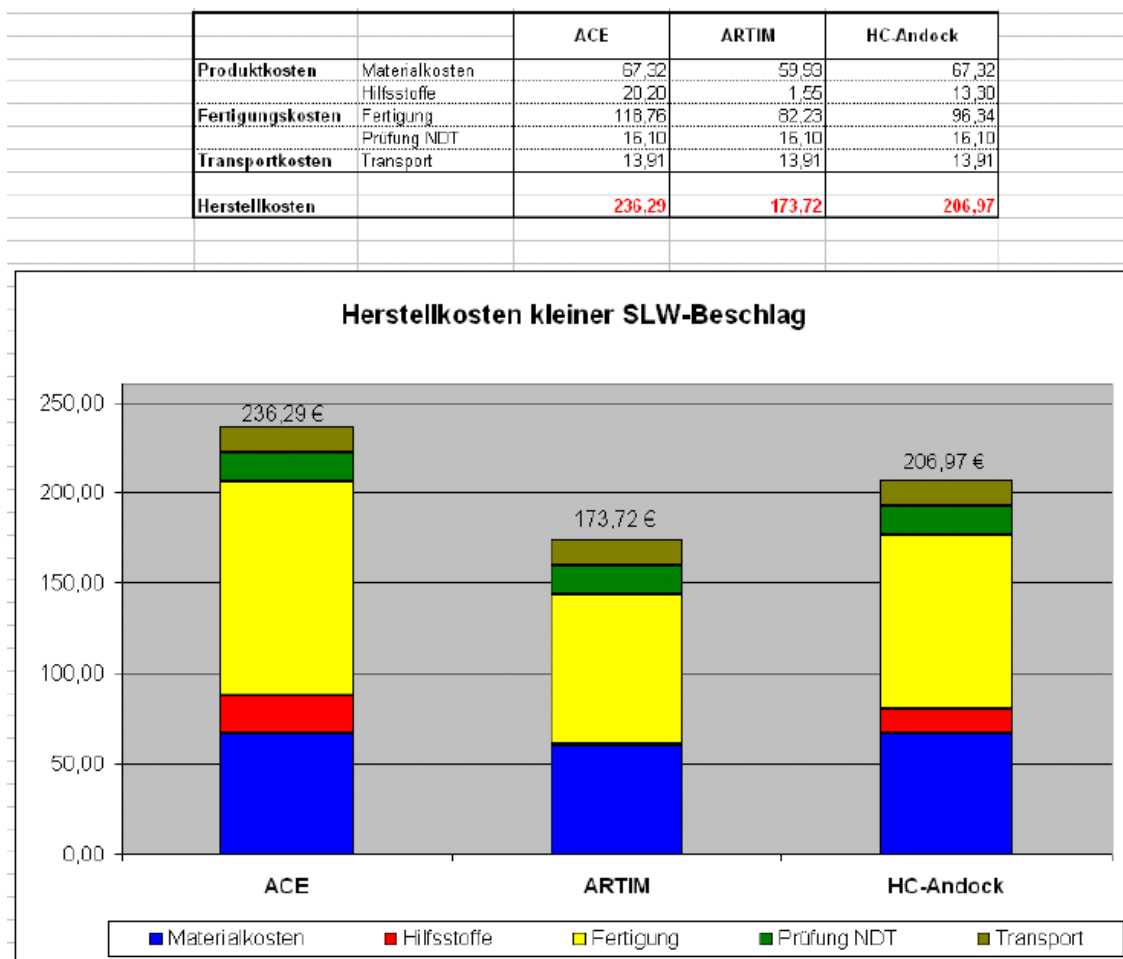


Abbildung 3-65: Variantenvergleich /14/

Als Ergebnis konnte somit festgestellt werden, dass das integrierte ARTIM-Verfahren Kostenvorteile zu den externen Kupplungsverfahren aufzeigt, wobei der Kostenunterschied primär durch die geringeren Fertigungskosten und die Hilfsstoffe begründet ist.

Mit dem Abschluss des RTM-Prozesses erfolgt der Abtransport der Vorrichtung zur Entnahme und Reinigungsstation.

Die Entnahme des Bauteils beginnt mit dem Öffnen der Vorrichtung. Dies ist ein kritischer Vorgang, da durch ein Verkanten des Deckels zur Form Schädigungen an der Vorrichtung entstehen können. Gelöst wurde dieses Problem über vier Keile, die seitlich und synchron den Deckel anheben. Nachdem der Deckel vom Bauteil gelöst ist, wird er in eine Schwenkeinrichtung gehoben und mit dieser um 90° in eine vertikale Lage gebracht.

Abbildung 3-66 zeigt die Anlagen- und Werkzeugkomponenten in geöffnetem Zustand.

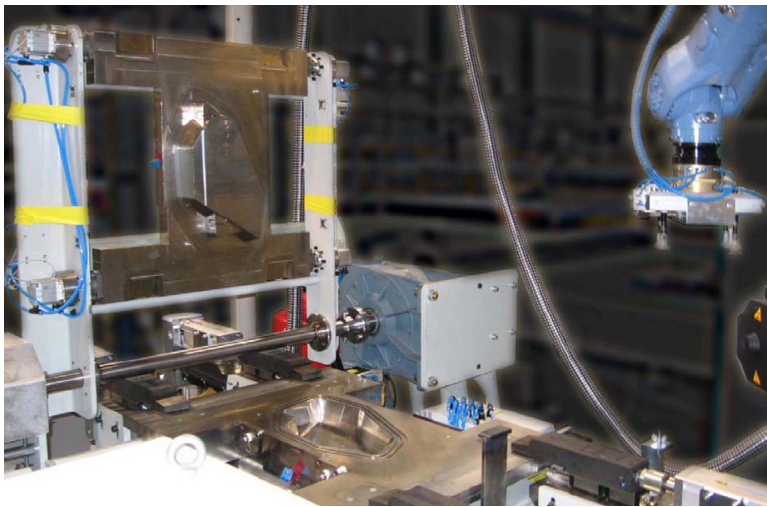


Abbildung 3-66: Position des Deckels und der Kavität bei der Bauteilentnahme und Reinigung /14/

Um das Bauteil endgültig aus der Vorrichtung zu entnehmen, wurde ein Greifsystem aus Saugern bzw. Vakuumnapfen entwickelt (Abbildung 3-67), das über einen Roboterarm geführt wird.



Abbildung 3-67: Vakuumeffektor /14/

Dieser neue Handhabungsablauf optimiert den heutigen manuellen Prozess erheblich, da Beschädigungen am Bauteil und der Vorrichtung durch Hilfsmittel wie Keile / Hämmer vermieden werden.

Bevor die Vorrichtung nach der Bauteilentnahme wieder dem neuen Produktionszyklus zugeführt werden kann, ist ein Reinigungsprozess erforderlich. Die nach dem Entformvorgang verbliebenen Harz- und Trennmittelreste müssen entfernt werden, um einen mangelfreien nächsten Fertigungszyklus zu garantieren.

Als Reinigungsverfahren stehen verschiedene Möglichkeiten zur Auswahl, wobei es wichtig ist, dass keine mechanischen Verfahren zur Anwendung kommen, da sonst die Standzeit des Werkzeuges erheblich beeinflusst wird.

Ein Beispiel eines möglichen Reinigungsverfahrens ist das CO₂-Trockeneisverfahren, dass mit einem Gemisch aus Druckluft, CO₂, und CO₂-Schneepartikeln arbeitet. Die aus flüssigem CO₂ erzeugten Trockeneispartikel werden mittels gebündeltem Reinigungsstrahl mit -78,5°C auf die Metalloberfläche gestrahlt.

Der dabei entstehende punktuelle Thermoschock lässt die Fette, Trennmittel und Harze verspröden. Durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten entstehen Spannungen an der Grenzschicht, diese werden durch den Aufprall der kinetischen Energie der Schneepartikel und dem gleichzeitigen Übergang von den festen Partikeln in die Gasphase (Sublimation) gelöst.

Mit der erzeugten Phasenumwandlung ist eine schlagartige Volumenänderung auf etwa das 600-fache verbunden. Dies bewirkt, dass sich die Schmutzpartikel schonend ablösen, bevor sie vom Reinigungsstrahl entsorgt werden.

Abbildung 3-68 zeigt das Reinigungsprinzip beim Trockeneisstrahlen.

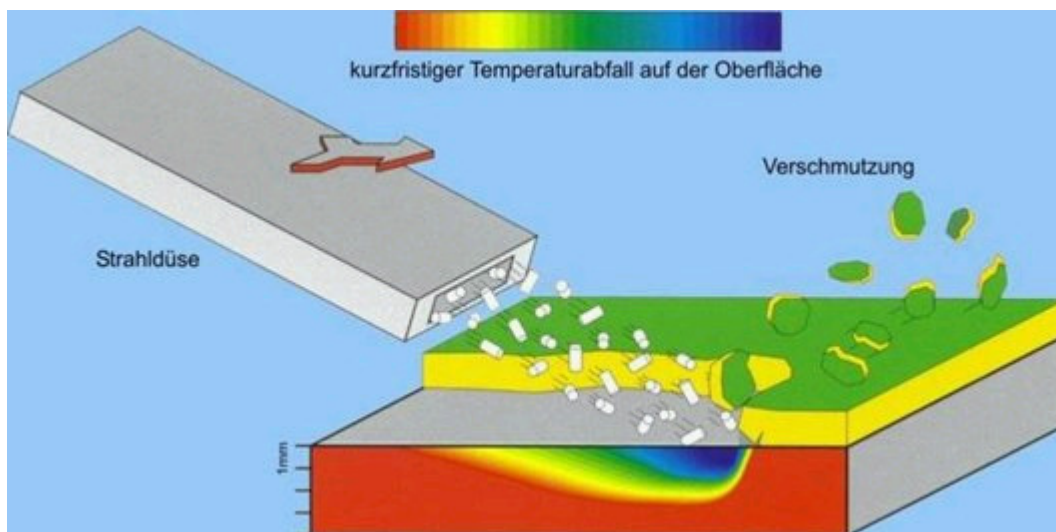


Abbildung 3-68: Reinigungsprinzip bei Trockeneisstrahlen (Quelle: www.icecleaner.de)

Nach Abschluss des Reinigungsprozesses wird gemäß Abbildung 3-35 das Werkzeug der Zwischenlagerung, Wartung oder dem erneuten Vorwärmen zugeführt.

Ein neuer Produktionszyklus kann nun beginnen.

Das beschriebene Auto-RTM-Verfahren hat nachweislich die geforderten Randbedingungen erfüllt. Die erzielten Ergebnisse und Prozessdefinitionen sollen mit Abschluss des Projektes in die Serienfertigung im Airbus-Werk Stade übernommen werden.

3.3 Automatisierung der Funktion Bearbeiten

3.3.1 Spannsystem

Unabdingbare Voraussetzung für einen gesicherten Bearbeitungsprozess ist das eingesetzte Spannsystem zur Fixierung der Bauteile.

Die Komplexität der Bearbeitung steht dabei in direkter Abhängigkeit zur Geometrie des Bauteils. Für ebene Bauteile gibt es heute einfache technische Lösungen, wie z.B. den Vakuumtisch mit integrierten Transportkugeln / -rollen, die vor bzw. nach dem Spannvorgang den Bauteiltransport übernehmen.

Bei dreidimensionalen Bauteilen und Abmessungen bis (LxBxH) 30.000 mm x 4.000 mm x 1.000 mm ist die Problemlösung wesentlich komplexer.

Insbesondere die Varianz der unterschiedlichen Bauteilabmessungen / -geometrien und die jeweilige Losgröße, die im Flugzeugbau aufgrund der Stückkosten vorzugsweise 1 ist, erfordern besondere technische Lösungen.

Unter Berücksichtigung folgender Prämissen:

- Teilevielfalt > 5,
- Losgröße 1-5,
- Bearbeitungszeit pro Bauteil 1-10h,
- Konturgenaue Aufspannung $\pm 0,5$ mm,
- Bauteilwechselzeit (Spann- zu Spannzeit) 5-15 min

sind nachfolgende technische und innovative Lösungen denkbar bzw. realisierbar.

Dabei soll die bauteilgebundene Vorrichtung aus Flexibilitäts- und Kostengründen an dieser Stelle nicht weiter untersucht werden.

Die Grundüberlegung der Neuentwicklung basiert dabei auf der Erkenntnis, dass auch bei einer konturgenauen Vorrichtung das Bauteil immer nur eine Punkt- oder Linienberührung zur Vorrichtung hat.

Somit entstand ein Spannkonzep, das als Bauteilaufnahme / Spannfläche immer die Außenfläche bzw. die strakgebende Fläche verwendet, eine für die CFK-Fertigung sehr wichtige Voraussetzung.

Des Weiteren wurde zwischen dem konturgebenden Element und dem lagegebenden Element unterschieden.

Abbildung 3-69 zeigt ein kontur- und lagegebendes Positionierelement.



Abbildung 3-69: Kontur- (links) und lagegebendes (rechts) Positionierelement

Als Konturelement wird in der Regel eine Kalotte mit integrierter Vakuumversorgung eingesetzt.

Wichtig ist dabei, dass der Drehpunkt der Kalotte dem Bauteilauflagepunkt entspricht.

Zur Geometrie Anpassung ist die Kugel in der Kalotte um $\pm 45^\circ$ schwenkbar.

Für die Lagebestimmung auf der Vorrichtung ist die Positioniereinheit verantwortlich.

Dazu ist bereits in der Konstruktion des Bauteils ein Aufnahme- und Positionierkonzept vom Einzelteil bis hin zur Bauteilmontage erforderlich.

Bewährt hat sich in der Praxis ein Zwei-Punktaufnahmesystem gemäß Abbildung 3-70.

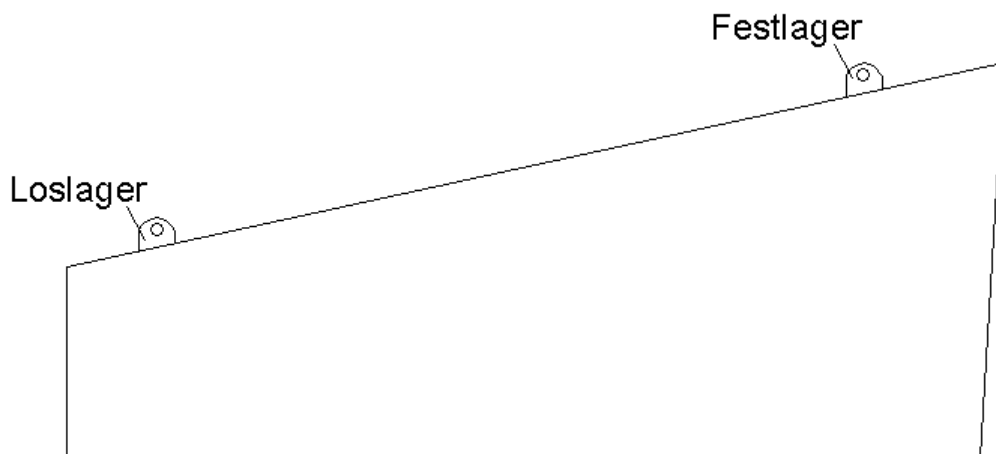


Abbildung 3-70: Prinzipskizze eines Zwei-Punktaufnahmesystems

Das Bauteil wird dabei in allen Prozessschritten in diesem Positioniersystem geführt und erst nach bzw. kurz vor der Montage entfernt. Zur Abstützung des Bauteils auf der Spannvorrichtung und zur Vermeidung von Schwingungen und Bauteilresonanzen während der Bearbeitung, dies gilt insbesondere für die Fräsbearbeitung, müssen die Vakuumsauger in definierten Abständen zueinander positioniert werden.

Hierzu wurden in den 90er Jahren im Airbus Werk Varel erste Lösungen entwickelt und aufgrund neuester NC-Technologie weiterentwickelt.

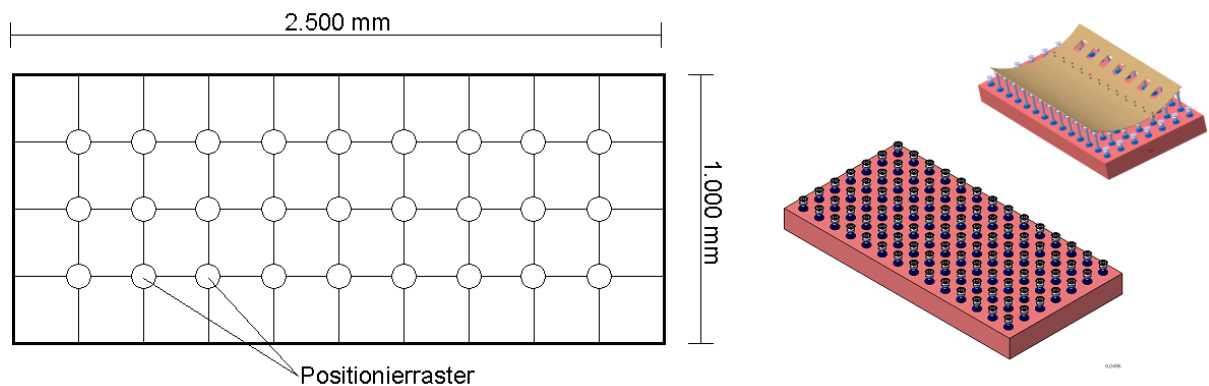


Abbildung 3-71: Statisches Rastersystem (Prinzipskizze sowie Spannsystem der Fa. Loxin /16/)

Bei dieser Lösung (Abbildung 3-71) sind die Vakuumsauger einem festen Koordinatensystem zugeordnet. Die Einstellmöglichkeit bezieht sich ausschließlich auf die z-Achse.

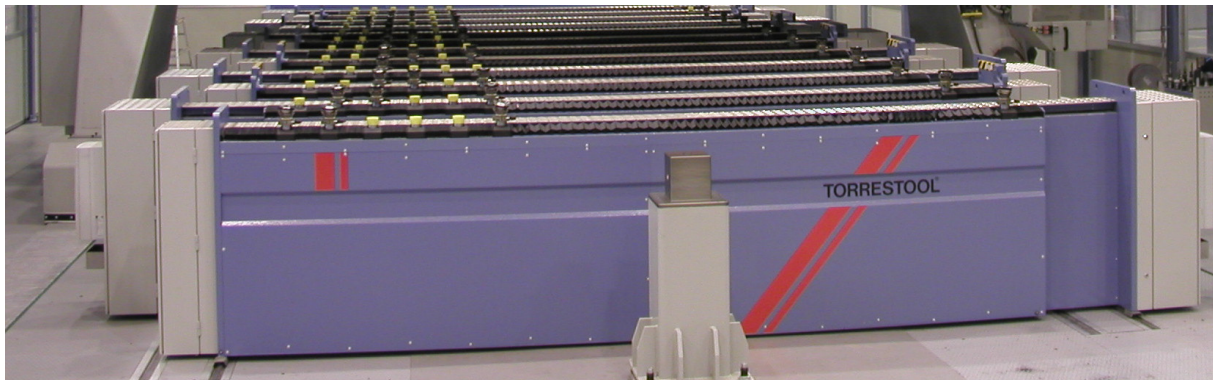


Abbildung 3-72: Multiflexibles Spannsystem (Quelle: Fa. Torres)

Das in Abbildung 3-72 dargestellte multiflexible Spannsystem basiert auf einer variablen Zahl von x-Brücken, auf denen jeweils 1-10 Saugersysteme platziert sind.

Gesteuert wird das Spannsystem über eine NC-Steuerung mit über 200 NC-Achsen je nach Anlagenauslegung. Da alle NC-Achsen gleichzeitig angesteuert werden können, sind Umrüstzeiten von 5 min umsetzbar.

Eine weiterer Vorteil dieser Spanntechnologie ist die variable Einsetzbarkeit in den unterschiedlichen Bearbeitungstechnologien, wie z.B.

- Zerspanungstechnologie,
- Wasserstrahltechnologie,
- Lasertechnologie,
- Montagetechnologie.

3.3.2 Bearbeitungsprozess

3.3.2.1 Geometrische Bearbeitung von CFK-Bauteilen

Die Herstellung von CFK-Komponenten erfolgt bis auf wenige Ausnahmen, wie z.B. dem RTM-Verfahren nicht endkonturgenau.

Anforderungen aus der Montage, wie etwa die Erzeugung von Durchbrüchen, Bohrungen, Passflächen, etc. erfordern spezielle Verfahren der Materialbearbeitung. Für die Bearbeitung von CFK-Bauteilen gelten folgende Prämissen:

- Einhaltung von zeichnungsgebundenen Vorgaben (Maß- und Formtoleranzen),
- Vermeidung von Absplitterung, Ausfransungen, Delaminationen und Aufstauchungen (siehe Abbildung 3-73),
- Vermeidung von thermischen Schäden,
- Einhaltung der Oberflächengüte,
- Absaugung der CFK-Stäube bei Trockenbearbeitung,
- nasse / trockene Bearbeitung ohne Verunreinigung durch Schmiermittel,
- keine bzw. geringe Lärmbelästigung für die Mitarbeiter.

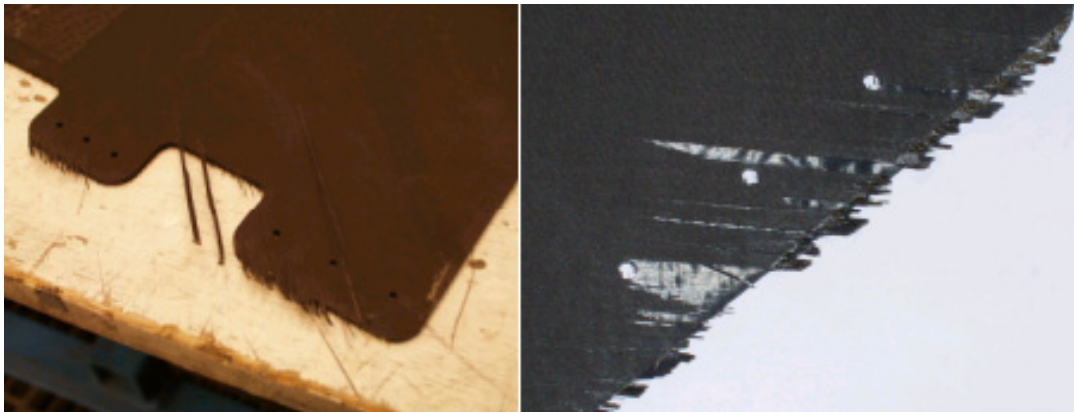


Abbildung 3-73: Beispiele für während des Fräsprozesses aufgetretene Schäden (Ausfransungen, Delaminationen)

Zur Umsetzung dieser Prämissen haben sich in Zusammenarbeit mit den Teileproduzenten und Anlagenherstellern zwei Bearbeitungsverfahren,

- die mechanische Fräsbearbeitung und
- das Wasserstrahlschneiden,

durchgesetzt.

Bei der mechanischen Bearbeitung von Bauteilen mittels Spindel wird in Abhängigkeit der Bearbeitungsaufgabe zwischen zwei Anlageformen / -konstruktionen unterschieden.

Liegt der Schwerpunkt der Bearbeitung auf Umriss- oder Flächenbearbeitung, so werden in der Regel folgende Maschinenkonzepte eingesetzt:

- Tiefbett-Gantry-Bearbeitungsmaschinen (Abbildung 3-74) mit den folgenden technischen Leistungsdaten:

Spindelwerte	Drehmoment von 0 - 30.000 U/min	21,2 Nm
	Leistungsbereich von 0-30.000 U/min	20 kW
	Max. Drehzahl	30.000 U/min
Max. Vorschubgeschwindigkeit	Linearachsen X,Y	30-40 m/min
	Linearachse Z	15 m/min
	Schwenk (A) - u. Drehachse (C)	8,33 U/min
Max. Beschleunigung	Linearachsen X,Y	bis 1 m/s ²
	Linearachse Z	bis 1 m/s ²
	Schwenk (A) - u. Drehachse (C)	bis 1,6 °/s ²

Tabelle 3-3: Leistungsdaten von Tiefbett-Gantry-Bearbeitungsmaschinen (ohne Werkzeug-eingriff)



Abbildung 3-74: Tiefbett-Gantry-Bearbeitungsmaschine der Fa. MTorres

- Bearbeitungsmaschinen in Ständerbauweise (Abbildung 3-75) mit den folgenden technischen Leistungsdaten:

Spindelwerte	Drehmoment von 0 - 20.000 U/min	15 Nm
	Leistungsbereich von 0-20.000 U/min	12 kW
	Max. Drehzahl	20.000 U/min
Max. Vorschubgeschwindigkeit	Linearachsen X,Y	10 m/min
	Linearachse Z	10 m/min
	Schwenk (A) - u. Drehachse (C)	5 U/min
Max. Beschleunigung	Linearachsen X,Y	bis 0,5 m/s ²
	Linearachse Z	bis 0,5 m/s ²
	Schwenk (A) - u. Drehachse (C)	bis 0,7 °/s ²

Tabelle 3-4: Leistungsdaten von Bearbeitungsmaschinen in Ständerbauweise (ohne Werkzeugeingriff)



Abbildung 3-75: Bearbeitungsmaschine in Ständerbauweise der Fa. Forest-Line

Aus den allgemeinen Daten ist erkennbar, dass HSC-Ansätze³⁵ in der CFK-Bearbeitung mit dem heutigen Stand der Technik nicht umsetzbar sind. Beschleunigungswerte von 10 m/s^2 oder Geschwindigkeiten von $60\text{-}100 \text{ m/min}$ sind aufgrund der Reibungsverhältnisse und den daraus entstehenden Temperaturen und Standzeiten der Werkzeuge nicht realisierbar. Wird die Bearbeitungsaufgabe durch einen überproportionalen Positionieranteil geprägt, d.h. den Hauptanteil der Bearbeitungszeit bildet das Positionieren der Werkzeuge zum Bauteil, dann bieten sich nachfolgende Maschinenkonzepte an:

- Hochbett-Bearbeitungsmaschinen (Abbildung 3-76) mit den folgenden technischen Leistungsdaten:

Spindelwerte	Drehmoment von 0 - 30.000 U/min	21,2 Nm
	Leistungsbereich von 0-30.000 U/min	20 kW
	Max. Drehzahl	30.000 U/min
Max. Vorschubgeschwindigkeit	Linearachsen X,Y	65 m/min
	Linearachse Z	65 m/min
	Schwenk (A) - u. Drehachse (C)	20 U/min
Max. Beschleunigung	Linearachsen X,Y	bis 5 m/s^2
	Linearachse Z	Bis 5 m/s^2
	Schwenk (A) - u. Drehachse (C)	bis $2^\circ/\text{s}^2$

Tabelle 3-5: Leistungsdaten von Hochbett-Bearbeitungsmaschinen



Abbildung 3-76: Hochbett-Bearbeitungsmaschine der Fa. Fooke

³⁵ HSC steht für Hochgeschwindigkeitsfräsprozesse (von englisch: High Speed Cutting)

- Knickarm-Robotersysteme (Abbildung 3-77) mit den folgenden technischen Leistungsdaten:

Spindelwerte	Drehmoment von 500 - 6.000 U/min	1 Nm
	Nennleistung	0,53 kW
	Max. Drehzahl	6.000 U/min
Max. Achsgeschwindigkeit	Achse 1	14,83 U/min
	Achse 2	14,83 U/min
	Achse 3	15,5 U/min
	Achse 4	18,17 U/min
	Achse 5	18,67 U/min
	Achse 6	26,17 U/min
Max. Beschleunigung		1,8 °/s ²

Tabelle 3-6: Leistungsdaten von Knickarm-Robotersystemen



Abbildung 3-77: Knickarmrobotersystem der Fa. Hydro-Control

Bei der mechanischen Bearbeitung ist, unabhängig von Maschinen- und Anlagenkonzept, die Standzeit des Werkzeuges der prozessbestimmende Faktor.

Untersuchungen und Forschungen am Werkzeug und Werkstoff zeigen die in den folgenden Abbildungen dargestellten Entwicklungen.

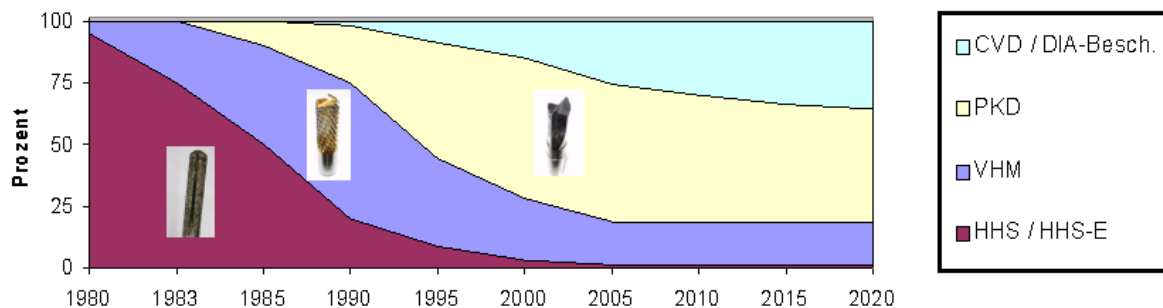


Abbildung 3-78: Entwicklung der für die CFK-Bearbeitung eingesetzten Bohrermaterialien

Für die eingesetzten Werkstoffe (CVD/Diamant-Beschichtung, PKD, VHM, HHS / HHS-E) gelten dabei folgende Standzeiten:

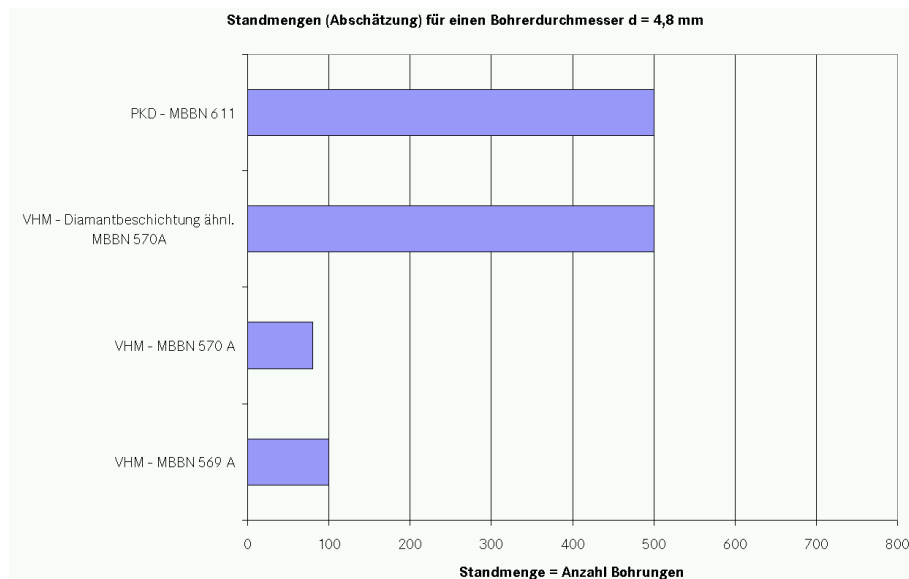


Abbildung 3-79: Standmenge für verschiedene Bohrermaterialien

Neben den verwendeten Werkstoffen und Beschichtungen hat die Schneidengeometrie ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf das Standzeitverhalten der Werkzeuge.

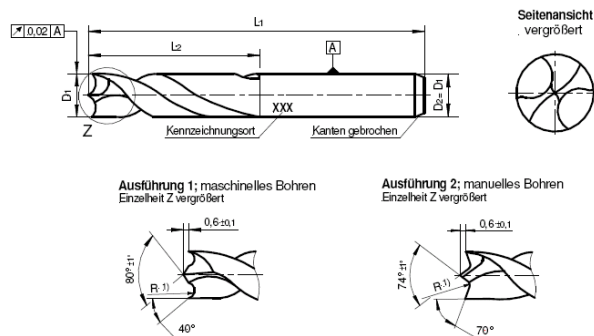


Abbildung 3-80: VHM-Werkzeug – Sichelbohrkopf

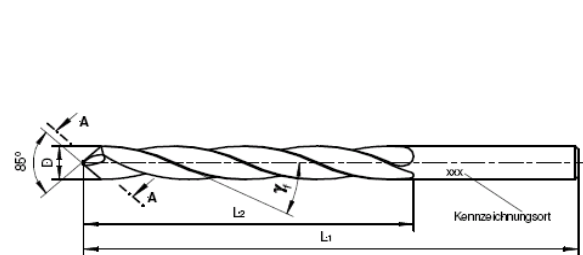


Abbildung 3-81: VHM-Werkzeug – Spiralbohrkopf

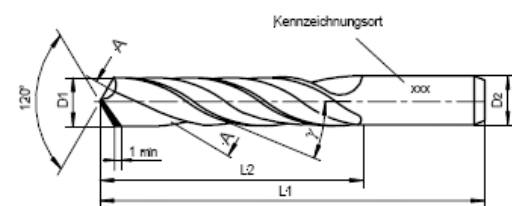


Abbildung 3-82: VHM-Werkzeug – Spiralbohrer mit eingelöteten oder eingesinterten PKD-Schneiden

Die positive Weiterentwicklung von Werkstoffen und Geometrien zur Optimierung der Standzeiten wird allerdings durch die parallele Forschung und Einführung neuer CFK-Tapematerialien, d.h. neuer Fasern und Matrixsysteme, stark negativ beeinflusst.

Abbildung 3-83 zeigt die Entwicklung der Faser bzw. des E-Moduls, der Biegefestigkeit und des Faservolumengehalts auf die normierte Standzeit beim Bohren.

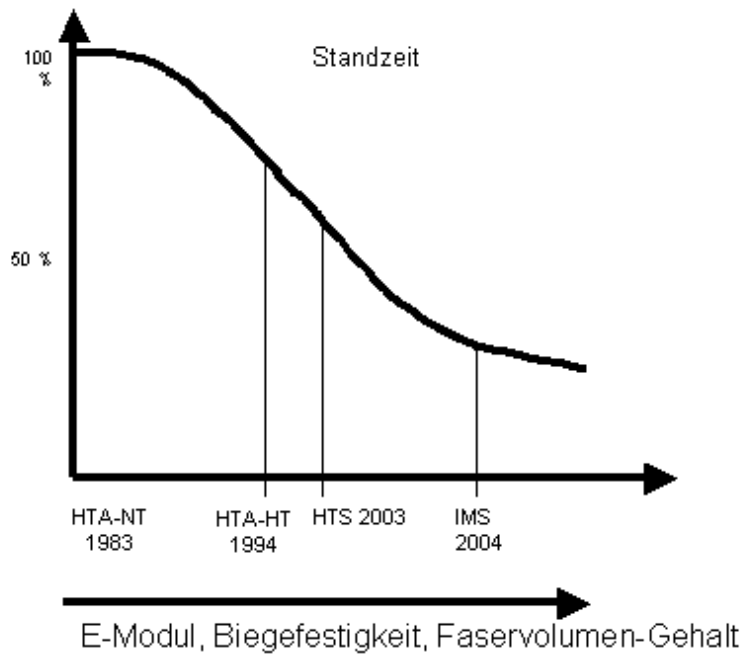


Abbildung 3-83: Entwicklung der Standzeit in Abhängigkeit der Fasereigenschaften

Aufgrund dieser konkurrierenden Randbedingungen konzentrieren sich die Entwicklungen und Forschungen zum Einen auf neue Werkstoffe und Werkzeuge für die mechanische Bearbeitung, zum Anderen aber auf ein neues Verfahren, dem Wasserstrahlschneiden.

Dem Anfang der 80er Jahre entwickelten Hochdruck-Wasserstrahlschneiden gelang erst in den 90er Jahren durch die Verwendung bzw. Beimischung von Feststoffpartikeln zur Leistungssteigerung des Wasserstrahls der entscheidende Durchbruch. /12/

Das nach DIN 8580 und DIN 8200 definierte Verfahren arbeitet mit einem Systemdruck zwischen 1.000 und 6.000 bar. Über Hochdruckleitungen wird das Wasser der Schneid-düse mit einem Durchmesser von 0,1-0,35 mm zugeführt. Die entstehende kinetische Energie im Schneidstrahl wird beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche in potentielle Energie umgewandelt.

Die dadurch entstehenden Spannungen haben eine plastische Verformung und schließlich eine Zerstörung der Werkstückoberfläche zur Folge. Durch die Strömung und den hohen Druck reißt der Wasserstrahl mikroskopisch kleine Teilchen aus dem Werkstück. Mit zunehmender Tiefe sinkt die Energie durch Reibungsverluste an den Schnittflächen. Dadurch nimmt die Schnittgüte kontinuierlich mit der Schnittdicke ab /12/.

Für den Einsatz mit CFK-Werkstoffen kommt ausschließlich das Abrasivwasserstrahl-schneidverfahren zur Anwendung.

Beim Abrasivverfahren wird gemäß Abbildung 3-84 zwischen dem Abrasivinjektor- und dem Abrasivsuspensionswasserstrahlschneiden unterschieden. Als Abrasivmittel wird in der Regel feinkörniger Granat- oder Olivinsand in der Größe von 0,2-0,5 mm eingesetzt.

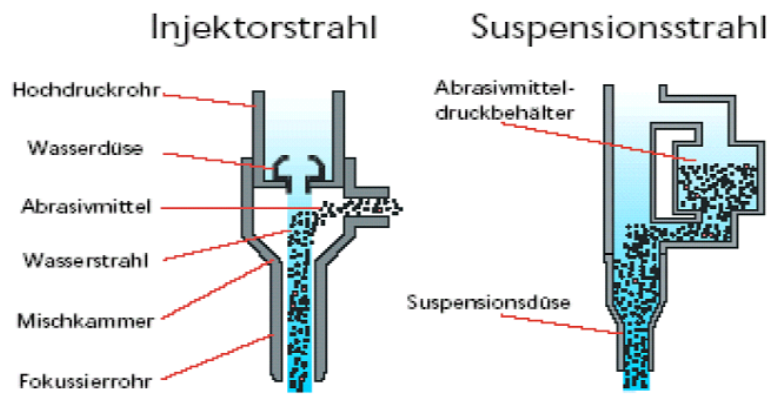


Abbildung 3-84: Verfahrensvarianten beim Wasserstrahlschneiden

Der technische Unterschied beider Strahlverfahren liegt in der Zuführung des Abrasivmittels.

Beim Abrasivinjektorwasserstrahlschneiden wird das Abrasivmittel durch Unterdruck angesaugt und mit dem Wasserstrahl durch Impulsübertragung beschleunigt. Dabei befindet sich das Abrasivmittel in einem externen Zusatzbehälter, der nicht unter Druck steht und nicht von Wasser durchflossen wird. Der Wasserstrahl wird durch eine konventionelle Wasserdüse beschleunigt, vermischt sich in der Mischkammer mit dem Abrasivmittel und tritt durch das Fokussierrohr aus. Die Dosierung des Abrasivmittels erfolgt in der Regel über eine Schwing- oder Rüttelrinne oder einen Schneckenförderer /21/.

Beim Suspensionswasserstrahlschneiden wird das Abrasivmittel in einem mit Druck beaufschlagten, von Wasser durchflossenen Behälter aufbewahrt. Dieser Behälter ist dem Hauptwasserstrahl als Bypass zugeschaltet, wobei die Dosierung des Abrasivmittels über die Regelung der Massenströme erfolgt /4/.

Beim Aufbau einer Wasserstrahlschneidanlage wird zwischen folgenden wesentlichen Komponenten unterschieden:

- Hochdruckaggregat,
- Hochdruckleitungen,
- Schneid- und Wasseraufbereitungssystem,
- Filtersystem.

Das für die Schnittqualität und die Schnittleistung bestimmende Aggregat ist die Hochdruckpumpe (Abbildung 3-85).

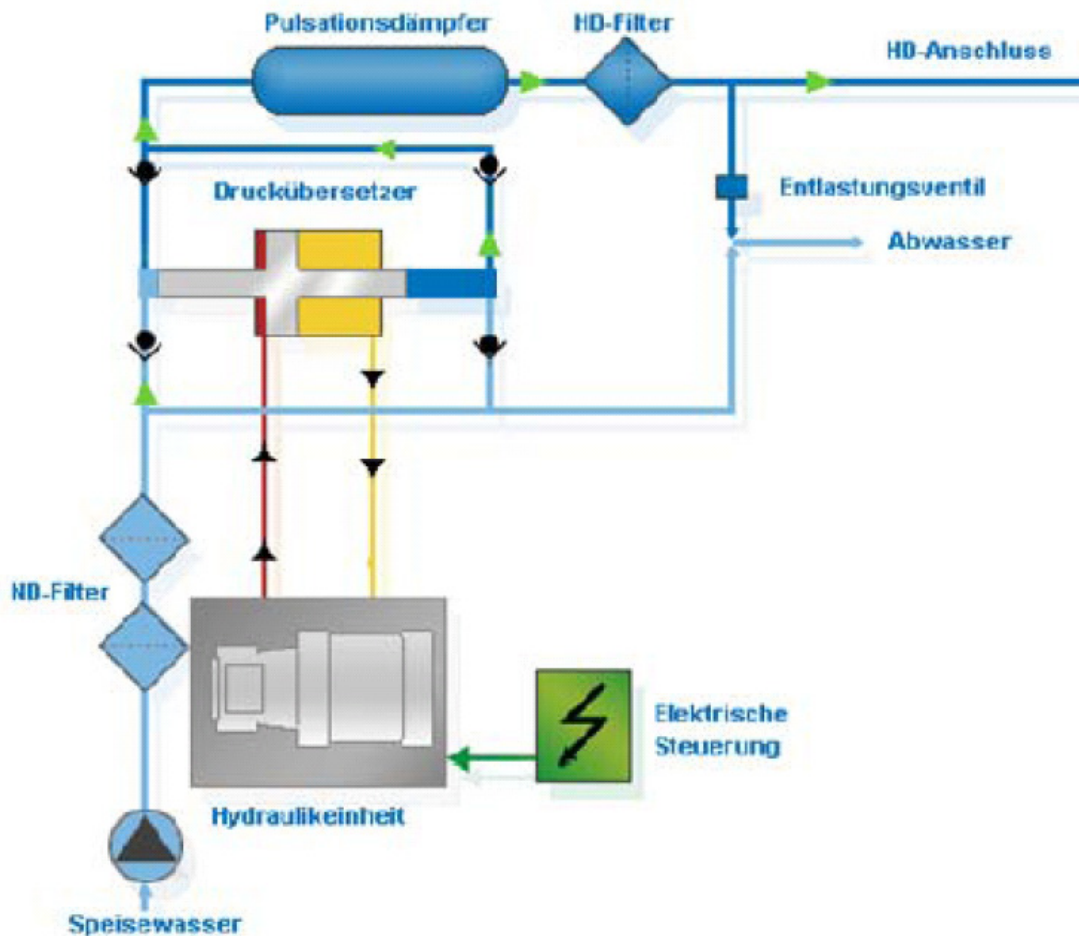


Abbildung 3-85: Funktionsprinzip der Druckerzeugung /21/

Der über eine selbstregelnde Ölpumpe angesteuerte Hydraulikzylinder erzeugt über eine Druckübersetzung von 1:20 4.000-6.000 bar Wasserdruck im System.

Zur Vermeidung von Druckschwankungen werden sogenannte Pulsationsdämpfer, d.h. Gashochdruckspeicher eingesetzt, die die Druckschwankungen, hervorgerufen durch die Umkehrung des Hydraulikkolbens, dämpfen.

Das hochverdichtete Wasser wird dann dem Schneidkopf zugeführt.

Im Schneidkopf selbst erfolgt die Zuführung des Abrasivmittels. Im Fokussierrohr wird der Strahl dann erneut ausgerichtet, gebündelt und der Düse zugeführt. Danach verlässt das Gemisch die Düse mit 900 m/s, wobei erhebliche Reibkräfte entstehen, die nur mit speziellen Materialien wie z.B. Diamant, Rubin oder Saphir beherrschbar sind.

Nach dem Austreten des Wasserstrahls aus dem Bauteil muss dieser wieder über einen Strahlfänger oder Catcher aufgefangen werden.

Beim ebenen Bauteil erfolgt dies über ein unter dem Bauteil positioniertes Wasserbecken. Für die komplexe 5-Achsenbearbeitung werden gemäß Abbildung 3-86 mitführende Catcher eingesetzt.

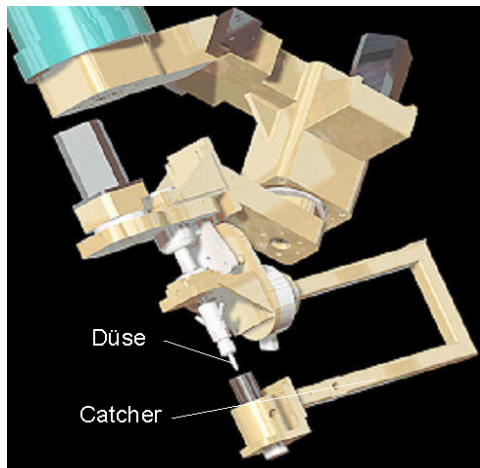


Abbildung 3-86: Am Schneidkopf mitgeführter Catcher zu Aufnahme des Wasserstrahls /21/

Der mit Keramikugeln gefüllte Catcher arbeitet synchron mit dem Schneidkopf und vernichtet die Restenergie, wobei extreme Schallemissionen und ein hoher Spritzwasseranteil entstehen können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die erzeugbare Schnittkantenqualität.

Neben den Maschinenparametern

- Düsen-/Mischrohrdurchmesser,
- Abrasivkorngröße,
- Durchflussmenge des Abrasivs,
- Wasserdruck ,
- Abstand Düse / Bauteil,

die einmalig eingestellt werden, ist der Anlagenvorschub und die Bauteildicke der entscheidende Faktor der Kantenqualität.

Bei der Beurteilung der Kantengüte wird zwischen zwei Parametern,

- dem Rillennachlauf und
- der Winkelabweichung

unterschieden.

Der Rillennachlauf entsteht durch das Eindringen des Strahls in das Werkstück und bildet eine gekrümmte Form. Dabei spricht man zunächst von einem Prallabtrag. Mit zunehmender Eindringtiefe nimmt der Anteil des Prallabtrages ab und es findet durch die Reibung der beschleunigten Abrasivkörner ein sogenannter Reibabtrag statt. Dieser nimmt jedoch auch mit zunehmender Eindringtiefe in das Werkstück ab, wobei sich durch die verringerte Abtragwirkung eine Stufe bildet. Durch die Stufenbildung wird der Abtragvorgang noch weiter verringert. Dabei kommt der Abtragmechanismus im Kerbgrund fast völlig zum Stillstand und der Abtrag erfolgt hauptsächlich nur noch an der Oberfläche des Werkstücks.

Durch diesen fortwährenden Zyklus entstehen die einzelnen Stufen, die als Rillennachlauf bezeichnet werden. Dieser nimmt mit steigender Vorschubgeschwindigkeit zu /21/.

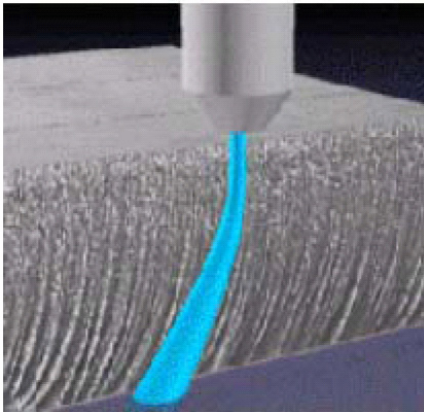


Abbildung 3-87: Rillennachlauf [Quelle: www.jitwaterjet.com]

Der Rillennachlauf ist eine negative Eigenschaft und kann durch das Messen der Oberflächenrauigkeit charakterisiert werden.

Eine weitere negative Eigenschaft, die sich an der Schnittkante des Bauteils abzeichnet, sind konisch ausgebildete Schnittkanten. Der Grund dafür ist die Streuung des Wasserstrahls, die mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit und bei sehr dicken, festen Werkstoffen intensiver auftritt.

Abbildung 3-88 zeigt die beschriebene Schnittfugenbreite; durch gezieltes Neigen der Düse kann diese Abweichung kompensiert werden.

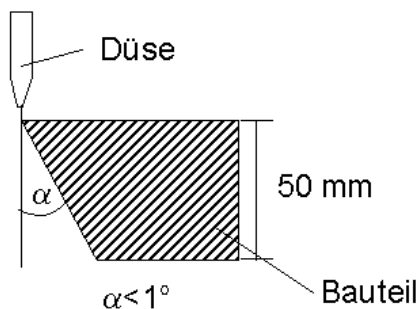


Abbildung 3-88: Schnittfugenbreite

Unter Berücksichtigung der dargestellten Parameter wurde in 2007 im Airbus-Werk Stade ein detailliertes Benchmark in Form einer Diplomarbeit zwischen dem

- Fräsverfahren und
- dem Abrasivwasserstrahlschneiden

am realen Bauteil durchgeführt /21/.

Als Versuchsbauteil wurde gemäß Abbildung 3-89 eine Seitenschale eines A380-Seitenleitwerks ausgewählt.

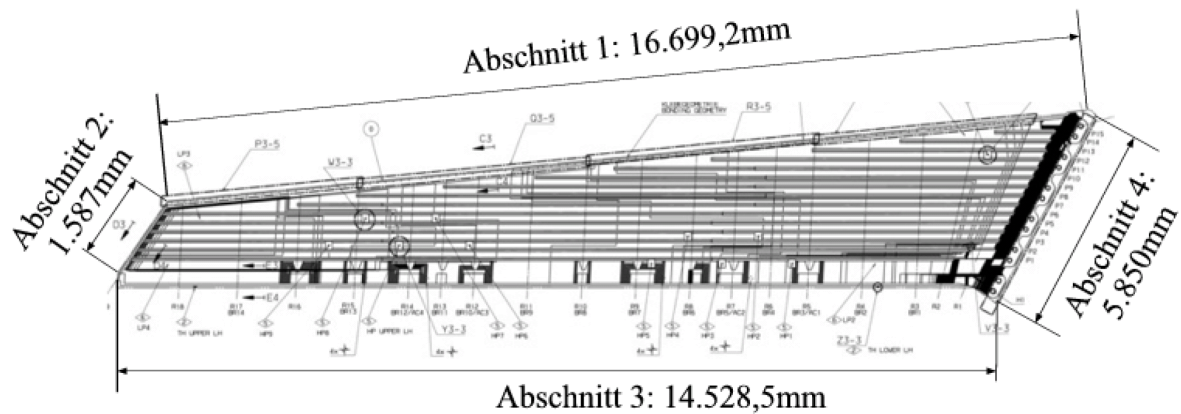


Abbildung 3-89: Versuchsbauteil /21/

Folgende Bauteilparameter waren Basis der Untersuchung (Tabelle 3-7).

Prepreg	Faserart	Lagenaufbau	Faser- / Harz- gehalt	Kantendicke	
				min	max
977-2	IMS	Multidirektional	35%	3,8 mm	35,0 mm

Tabelle 3-7: Bauteilparameter

Die Bearbeitungsaufgabe beinhaltete die Kantenbearbeitung mit einer Länge von 38.665 mm sowie die Herstellung von 12 Passbohrungen. Für die Anlagenparameter wurden die Fräsparmeter nach Tabelle 3-8 verwendet.

Parameter	Formelzeichen	Wert	Einheit
Vorschubgeschwindigkeit	v_f	1000	mm/min
Drehzahl	n	10000	1/min
Schnittgeschwindigkeit	v_c	1500-8000	mm/min
Vorschub	f	2000	mm/min
Schneidenvorschub	f_z	0,05	mm/Schneide

Tabelle 3-8: Parameter der Fräsbearbeitung /21/

In umfangreichen Versuchen wurde auf einer Testanlage der Firma Flow-Deutschland die Anlagenparameter der Abrasivwasserstrahlschneid-Bearbeitung definiert. Im Rahmen dieser Arbeit soll auf die detaillierte Darstellung der Versuchsprogramme verzichtet werden.

In Abhängigkeit der Qualitätsbeurteilung, d.h.

- Oberflächenprüfung,
- Ultraschallprüfung,
- Querschliffbilder,
- Winkelabweichung,

wurden folgende Maschinenparameter für die Bearbeitung zugelassen bzw. entsprechen den Qualitätsstandards der mechanischen Bearbeitung.

Abrasivmitteldurchfluss (kg/min)	0,58
Abrasivmittelkörnung (Mesh)	80
Wasserdurchfluss (l/min)	3,77
Düsendurchmesser (mm)	0,35
Mischrohrdurchmesser (mm)	1
Arbeitsdruck (bar)	4135
Vorschub (mm/min)	270-427

Tabelle 3-9: Maschinenparameter für die Bearbeitung mit Hilfe des Abrasivwasserstrahlschneidens /21/.

Unter Berücksichtigung der definierten Parameter und Testergebnisse ergibt sich folgendes Ergebnis (Tabelle 3-10).

	Fräsen	Abrasivwasserstrahl
Umrissbearbeitung (min)	63,00	19,16
Passbohrung (min)	76,00	57,60
Gesamtzeit pro Schale (min)	139,00	76,76
Differenz (min)	62,24	
Differenz in %	45%	

Tabelle 3-10: Gegenüberstellung der Bearbeitungszeiten /13/.

Aus der Gesamtbetrachtung heraus ergibt sich für das Abrasivwasserstrahlschneid-Verfahren ein Bearbeitungsvorteil von 45% bezogen auf das Testbauteil (Seitenleitwerkschale A380).

Im Rahmen der Diplomarbeit /21/ wurden auch die Fertigungsgemeinkosten beider Verfahren im Vergleich aufgezeigt.

	Fräsen	Abrasiv- wasserstrahl	Einheit
Verbrauchsmittel	1704,00	2,05	€/Schale
Instandhaltung	7,25	2,60	€/Schale
Strom	5,06	6,86	€/Schale
Wasser	-	0,07	€/Schale
Abrasivmittel	-	16,03	€/Schale
Entsorgung	9,01	7,21	€/Schale
Nacharbeiten	480,00	0,00	€/Schale
FGK gesamt pro Schale	2205,32	34,82	€/Schale
FGK gesamt pro AC	4410,64	69,64	€/AC
Differenz in €	4341		€/AC
Differenz in %	98,4		%

Tabelle 3-11: Gegenüberstellung der einzelnen Fertigungsgemeinkosten /21/.

Tabelle 3-11 zeigt die einzelnen Kosten, auf deren detaillierte Analyse in dieser Arbeit nicht eingegangen werden soll.

Allerdings zeigt der Vergleich auch die Grenzen des Verfahrens auf. Insbesondere in der Umrissbearbeitung kann das Abrasivwasserstrahlschneid-Verfahren die Vorteile maximal ausnutzen.

Liegen die Anforderungen der Bearbeitung allerdings im Bereich von Bohrungen (1-20 mm) oder Passbohrungen > 20 mm (z.B. mit H7-Qualität), dann kann die Bearbeitung nur durch einen Fräsprozess oder eine Kombination aus dem Abrasivwasserstrahlschneid-Verfahren und Fräsprozess, d.h. Ausschneiden der Kernbohrung mit nachträglichem Fräsen oder Ausspindeln der Bohrung erfolgen.

Daraus ergibt sich in der Konsequenz ein neues Maschinen- und Anlagenkonzept.

Abbildung 3-90 zeigt erste Konzepte einer kombinierten Anlage in Gantry-Bauweise mit zwei y/z-Pinolen für den Fräs- und Abrasivwasserstrahlschneid-Prozess.

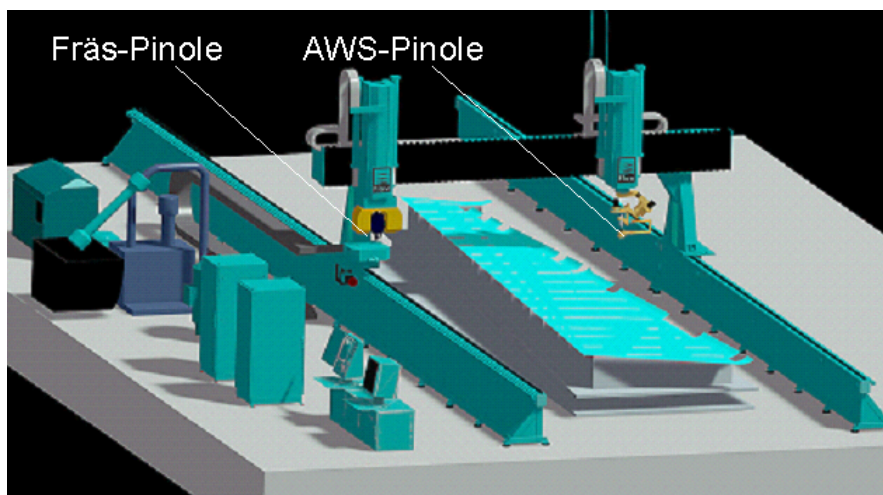


Abbildung 3-90: Kombiniertes Fräs- / Abrasivwasserstrahlschneid-Portal

3.3.2.2 Oberflächenvorbereitung durch Laserstrahl

Ein weiterer in der CFK-Produktion kritischer und aufwendiger Prozess ist die Durchführung des Oberflächenschutzes und in Verbindung damit die Oberflächenvorbehandlung für die abschließende Vor- und Endlackierung.

Aufgrund der hohen Affinität / Vernetzung des flüssigen Harzes im Autoklavprozess mit der Bauteilvorrichtung (Nickel-Stahl-Legierung, auch Dilaton genannt) bzw. der Oberflächenrauigkeit / Poren ist der Einsatz eines Trennmittels unabdingbar.

Als Trennmittel werden heute organische Systeme (aliphatische Kohlenwasserstoffe³⁶⁾ eingesetzt.

³⁶ Aliphatische Kohlenwasserstoffe sind organische (un)verzweigte ketten- oder ringförmige chemische Verbindungen, z.B. Cyclohexan (C₆H₁₂)

Die besonderen Eigenschaften des Trennmittels bei gleichzeitiger Aktivierung der Oberfläche ist eine Prozessvoraussetzung für einen abgesicherten, langlebigen Oberflächenschutz. Im Gegensatz zu metallischen Produktionsverfahren (Streckziehen, Tiefziehen), bei denen das Trennmittel in der Regel nicht thermisch reagiert, ist im CFK-Herstellungsprozess ein Entfernen des Trennmittels mit Lösemittel oder Ätzverfahren nicht möglich.

Das ausgehärtete Trennmittel muss in einem mechanischen Verfahrensschritt von der Oberfläche entfernt werden.

Dazu wurde in der Vergangenheit das in Abbildung 3-91 dargestellte Verfahren „Abschleifen mit Sandpapier“ eingesetzt.



Abbildung 3-91: Abschleifen der Oberfläche mit Sandpapier

Dieser sehr zeitaufwendige und mit hohen Arbeitsbelastungen (Staub, Lärm, Körperhaltung, Körperbelastung) verbundene Produktionsprozess beinhaltet zusätzlich eine teilweise mechanische Beschädigung der Faserstruktur sowie keine porentiefe Entfernung des Trennmittels.

Aus diesem Grund wurde vom Verfasser in 2002 eine Analyse alternativer Verfahren initiiert.

Erste positive Ansätze und Untersuchungen führten zur Anwendung von Laserstrahlen.

In Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma SLCR Lasertechnik Düren und den Grundlagen- und Anwendungsabteilungen von Airbus Deutschland wurde das sogenannte „Laserstripping“³⁷ in 4 Jahren entwickelt, patentiert und zur Serienanwendung gebracht.

³⁷ Laserstripping bezeichnet ein Verfahren zur Oberflächenvorbereitung mit Laserstrahl

Das Laserstripping basiert dabei auf einem TEA-CO₂-Laser³⁸ mit folgenden Leistungsdaten:

- Wellenlänge 10,6 μm
- Pulslänge $\sim 3 \mu\text{sec}$
- Pulsenergie 4 – 8 J
- Energiedichte
 - Entlacken 3 – 8 J/cm²
 - Aktivieren 2 – 4 J/cm²
- „Footprint“³⁹-Größe > 0,5 cm²
- Frequenz < 200 Hz

Als weitere Komponente wird ein Bauteilhandling- und Positioniersystem sowie eine Anlage/ Roboter für die Strahlführung benötigt.

In Abhängigkeit der Bauteildimensionen und Verformung werden, wie in Abbildung 3-92 dargestellt, 5-achsengesteuerte Anlagen eingesetzt.

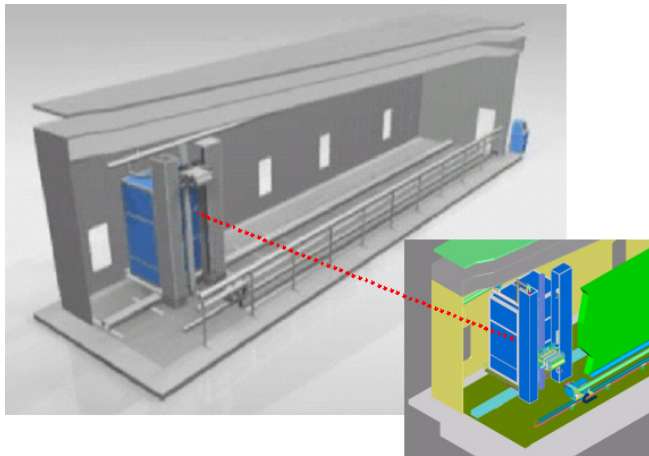


Abbildung 3-92: 5-achsengesteuerte Laserstripping-Anlage

Zur Erzielung einer reproduzierbaren Oberflächengüte sollte das Bauteil während der Bearbeitung in eine Ruheposition und in Abhängigkeit der Tiefschärfe des Lasers in einer Toleranz von <20 mm positioniert werden.

Bauteilgröße und Verformung limitieren das Verfahren nicht, allerdings sollte aufgrund der Strahlenabschirmung, Strahlenleistung sowie Lärmentwicklung (75-90 dB) eine geschlossene Kabine mit Grundabsaugung und starker Anlagenabsaugung installiert werden.

Zur Bearbeitung der Oberfläche wird ein TEA-CO₂-Laser mit 150 Impulsen und 1 kW Leistung eingesetzt.

³⁸ TEA-CO₂-Laser ist ein querangeregter Kohlendioxidlaser (transversal excited atmospheric pressure), der unter Atmosphärendruck arbeitet.

³⁹ Footprint bezeichnet die Größe (in cm²) der mit einem Laserimpuls bearbeiteten Fläche

Die Arbeitsbreite pro Anlagenpositionierung beträgt 600 mm (siehe auch Abbildung 3-93), die erzeugte Flächenleistung bis zu 30 m²/h. Im Vergleich hierzu erzielt man mit einer manuellen Schleifbearbeitung nur eine Flächenleistung von ca. 6 m²/h.

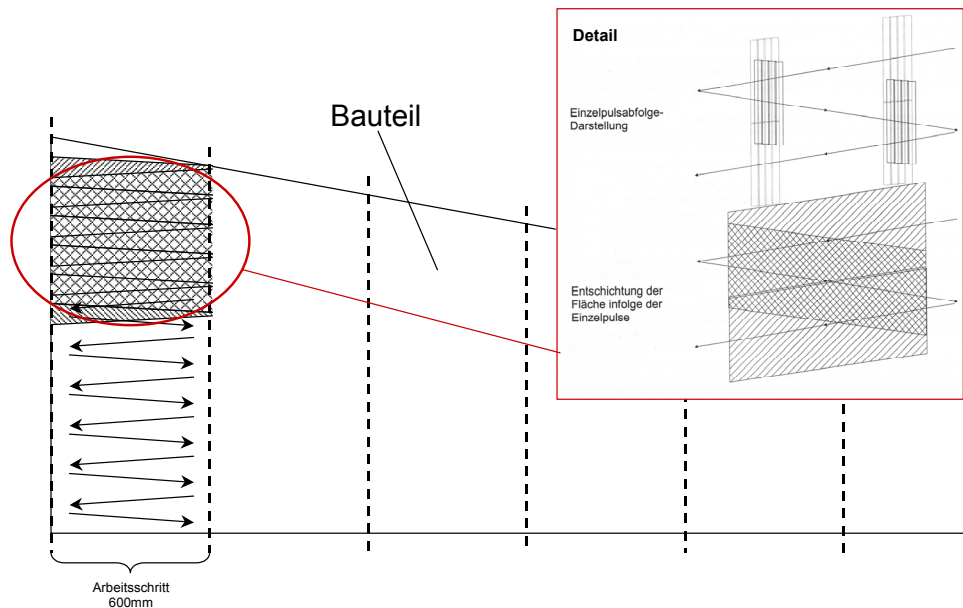


Abbildung 3-93: Prinzipdarstellung des Laserstripping-Verfahrens

Interne Untersuchungen zeigten, dass die Energiedichte I

$$I = \frac{P_M}{f \cdot A}, \text{ wobei } P_M \text{ die mittlere Laserleistung, } f \text{ die Pulsfrequenz und } A \text{ die Brennfleckgröße ist,}$$

für das Aktivieren und damit vollständige Abtragen des Trennmittels 2,5 J/cm² betragen muss, wobei jeder Bereich zweimal vom Laserstrahl bearbeitet werden muss, um eine vollständige Entfernung des verwendeten Trennmittels (hier: Marbocote) zu garantieren. Die Ergebnisse der internen Untersuchung mit verschiedenen Energiedichten sind in Abbildung 3-94 dargestellt.

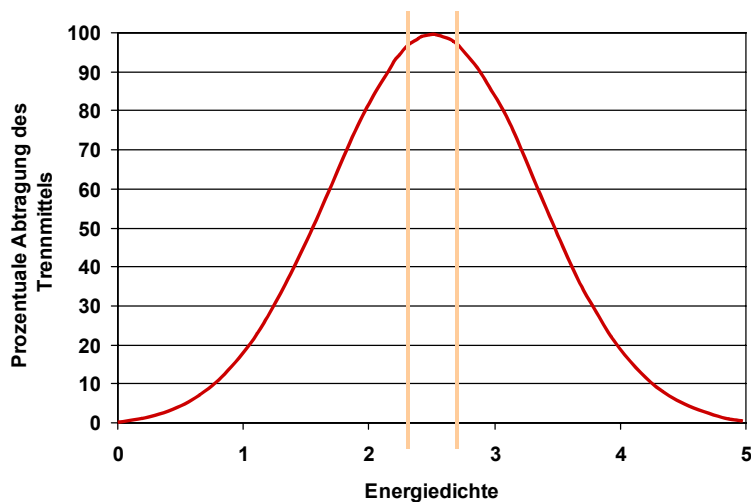


Abbildung 3-94: Versuchsergebnisse

Die Funktion der Laserbearbeitung durchläuft in Abhängigkeit der Zeit folgende Prinzipien/ Prozessschritte (siehe Abbildung 3-95).

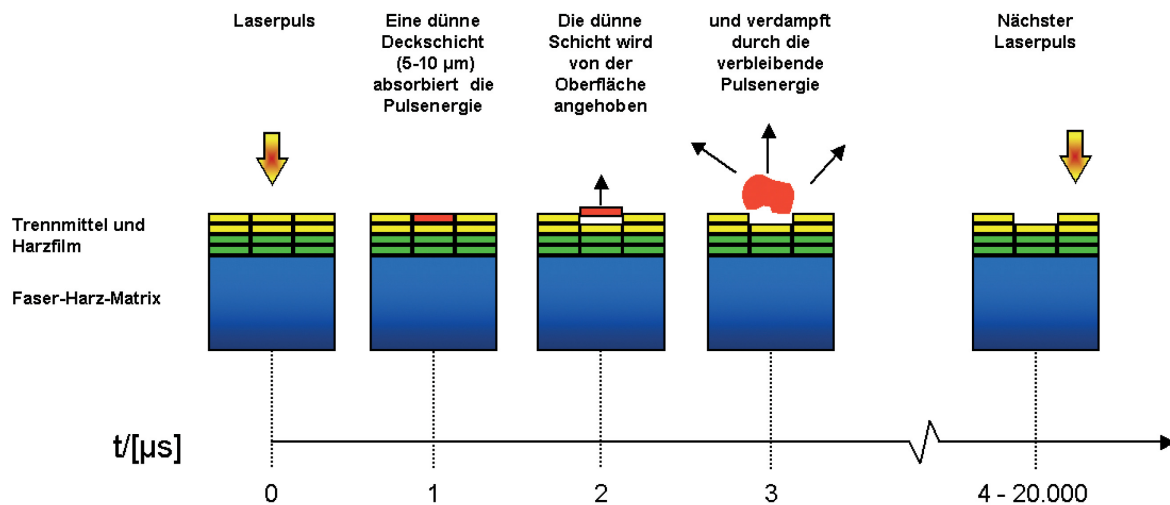


Abbildung 3-95: Prozessschritte der Laserstripping-Bearbeitung /20/

Die Reinigung und Aktivierung erfolgt durch die Reaktion der Laserstrahlung mit den organischen Komponenten auf der Oberfläche. Beim Aufbringen eines Laserpulses (Dauer ca. 3 μs) wird die Energie des Pulses in einer oberflächennahen Schicht bis zu max. 5-10 μm absorbiert. Hierdurch kommt es zu einer schlagartigen Verdampfung der organischen Materialien und somit dem Entfernen der Trennmittelreste. Gleichzeitig erfolgt durch die Wechselwirkung mit der Substrat-/Matrixoberfläche eine leichte Anrauhung der Oberfläche. Somit werden zwei Effekte mit der Laseraktivierung erzielt:

- Entfernen von Verunreinigungen und Trennmittelresten,
- Erhöhung der Oberflächenrauigkeit.

Beide Effekte zusammen führen zu einer dauerhaft guten Oberflächenvorbereitung bzw. Haftung. Dies wurde in Versuchen mit bis zu vier Wochen Zeitversatz zwischen Aktivieren und Lackieren nachgewiesen.

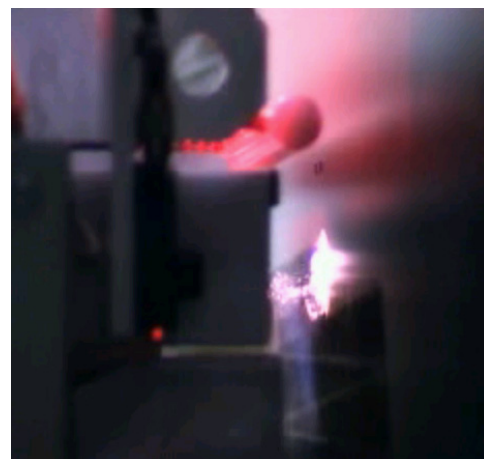
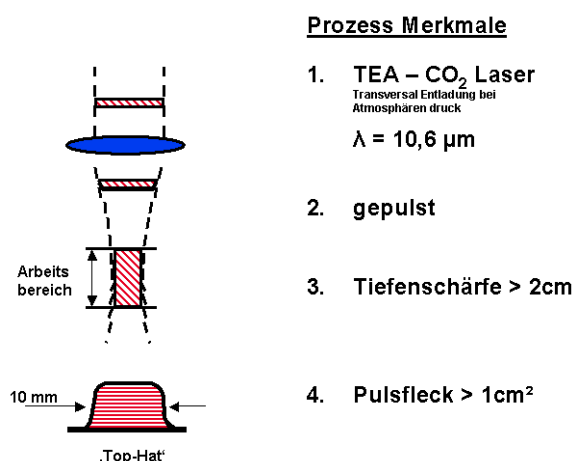


Abbildung 3-96: Prozessmerkmale des Laserstripping-Prozesses /20/

Die hohe Tiefenschärfe und der große Pulsfleck (Abbildung 3-96) sind dabei wichtige Eigenschaften. Sie sorgen dafür, dass eine gleichmäßige Bearbeitung auch für große, relativ ungenau positionierte Bauteile unter Einhaltung der festgelegten Prozessfenster möglich wird.

Die Hauptanforderungen an Laserquellen für die Oberflächenbearbeitung sind dabei wie folgt [SLCR]:

- Wellenlänge
Die Energie sollte von den Verunreinigungen oder dem zu entfernenden Anstrichsystem unabhängig von dessen Farbe gut absorbiert werden. Das Basismaterial sollte die auftreffende Strahlung reflektieren bzw. dadurch nicht verändert oder geschädigt werden.
- kurze Prozessdauer
Um keinerlei Schädigungspotenzial durch den Prozess zu generieren, soll die Einwirkung so kurz sein, dass kein unzulässiger Wärmetransport ins Basismaterial erfolgt. Daher ist die Pulsdauer kleiner $3\ \mu\text{s}$.
- hoher Leistungslevel mit großem Footprint
Um eine gleichmäßige Bearbeitung zu erzielen, soll ein möglichst großer Pulsfleck verwendet werden (möglichst $> 1\ \text{cm}^2$). Hierzu ist eine hohe Pulsenergie erforderlich (also Pulsenergie $> 4\ \text{J/puls}$). Dann kann bei den geforderten Fluenzen⁴⁰ $2\text{-}3\ \text{J/cm}^2$ ein großer Pulsfleck von deutlich über $1\ \text{cm}^2$ Fläche erzielt werden.
- großer Arbeitsbereich (Tiefenschärfe)
Um Unebenheiten, Variationen und Positionierungsungenauigkeiten des Bauteils auszugleichen, soll der Prozess möglichst tolerant sein. Dies beinhaltet eine große Tiefenschärfe, um den Arbeitsbereich entsprechend groß wählen zu können. Die Tiefenschärfe soll $> 20\text{mm}$ betragen.

Die Verwendung des Laseraktivierungsverfahrens führt zu einer qualitativ hochwertigen und reproduzierbaren Oberflächengüte.

Abbildung 3-97 zeigt den Oberflächenvergleich zwischen dem Handschleifen mit Sandpapier und dem Laserstripping.

Beim Handschleifen kommt es zu Beschädigungen der oberen CFK-Fasern, die tolerierbar sind, durch das Laserstripping jedoch verhindert werden können. Grund dafür ist die schlechte Einkopplung der Laserenergie in die CFK-Faser.

⁴⁰ Fluenz bezeichnet die auftreffende Leistung pro Fläche.

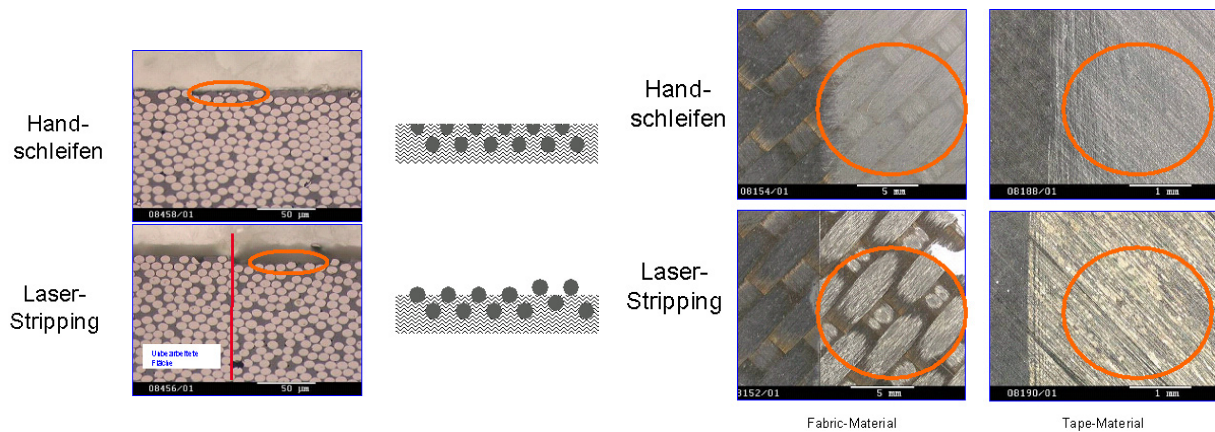


Abbildung 3-97: Oberflächenvergleich (Schnitt)

Abbildung 3-98: Oberflächenvergleich in Abhängigkeit vom eingesetzten Verfahren und Material

Abbildung 3-98 zeigt die Ergebnisse am Bauteil in Abhängigkeit vom eingesetzten Verfahren und vom verwendeten Material.

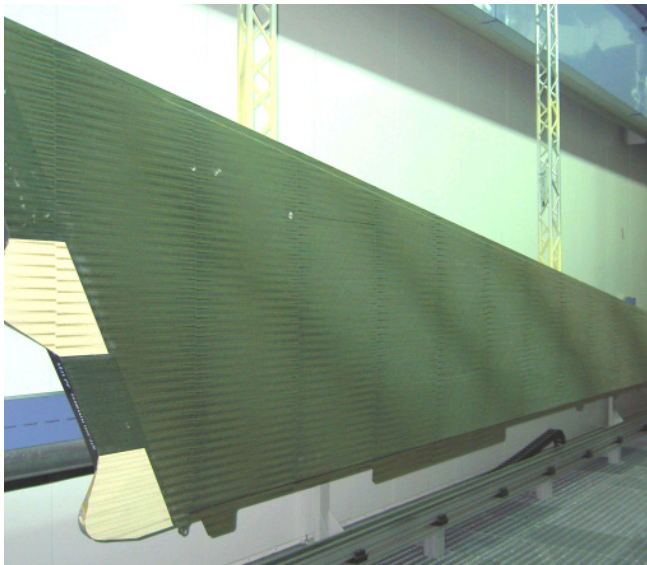


Abbildung 3-99: Seitenleitwerksschale nach dem Laserstripping-Prozess

Aus der Gesamtbeurteilung des Laserstripping-Verfahrens ergeben sich für den Oberflächenaktivierungsprozess folgende Vorteile:

- reproduzierbare Qualität,
- nachweisbare Prozessstabilität,
- optimale Ergonomieverhältnisse,
- hoher Automatisierungsgrad,
- gutes Kosten- / Leistungsverhältnis,
- keine Umweltbelastungen.

3.4 Automatisierung der Funktion Fördern und Speichern

Neben den eigentlichen CFK-Prozessen übernimmt das eingebundene Materialflusssystem wichtige Funktionen im Herstellungsprozess.

Der Prozessablauf (siehe Abbildung 3-100) stellt unterschiedliche Anforderungen an das System, die im nachfolgenden näher untersucht werden sollen. Grundsätzlich wird das Materialflusssystem von der Bauteilgröße, Form und Gewicht bestimmt. Ein weiterer Gesichtspunkt ist das Maschinen- und Anlagelayout sowie die Gebäudestruktur. Bestimmend für den Automatisierungsgrad sind Produktionsstückzahl und Personalaufwand oder zusammengefasst die Wirtschaftlichkeit und Amortisationszeit.

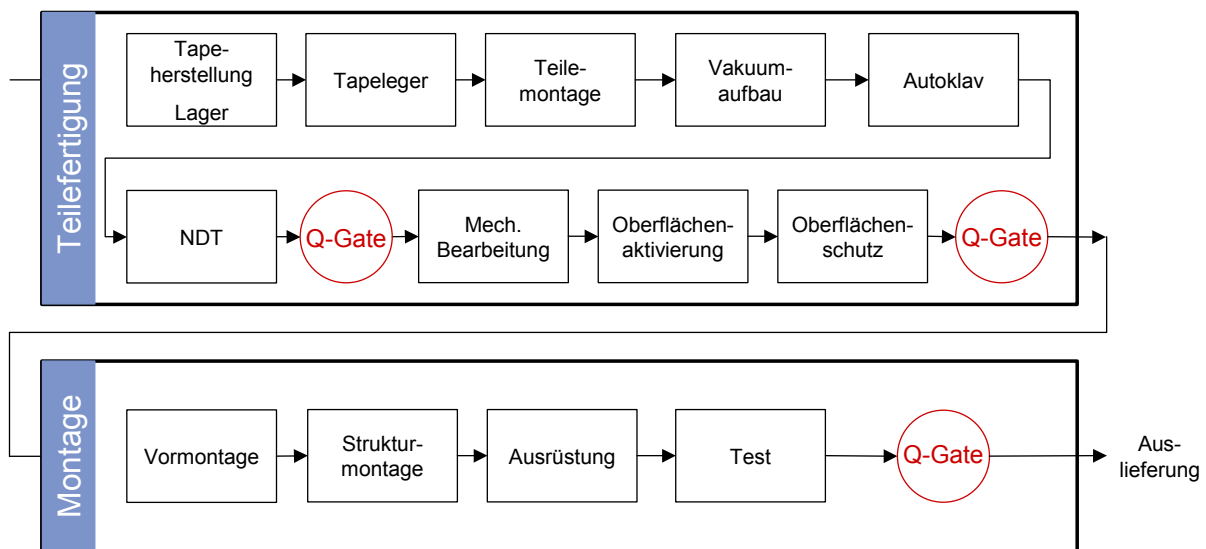


Abbildung 3-100: Prozessablauf

Für den Herstellungsprozess großer, leicht gekrümmter CFK-Schalen sind folgende Ansätze zu analysieren.

3.4.1 Materialflusskonzept

Das Materialflusskonzept für große Bauteile:

- Bauteillänge: 3 – 20 m,
- Bauteilbreite: 0,2 – 0,5 m,
- Bauteilhöhe: 0,5 – 4 m,
- Bauteilgewicht: 500 – 4.000 kg

sollte ausschließlich einer Transportrichtung folgen. Bauteildrehungen 90° / 180° / 360° müssen vermieden werden. Abbildung 3-101 zeigt das Produktlinienkonzept des Airbus-Werkes Stade für Seitenleitwerke.

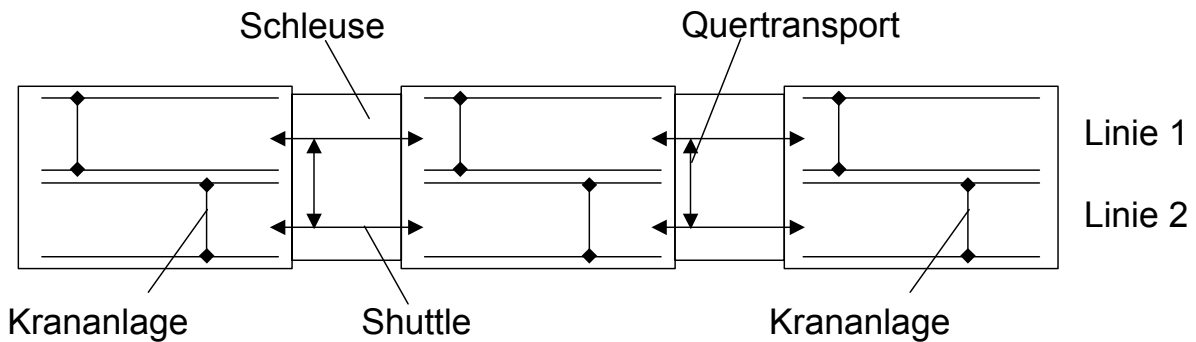


Abbildung 3-101: Produktlinienkonzept des Airbus-Werkes Stade

Beide Produktlinien sind autark, das Materialflusssystem besteht aus Krananlagen und bodengeführten Transportshuttles. In den Schleusen sind Krananlagen montiert, die die Bauteile parallel von Linie 1 in die Linie 2 versetzen können, dies ist bei Anlagenausfall sinnvoll und bildet eine Notfallstrategie ab. Alle eingesetzten Transportkomponenten sind baugleich und reduzieren somit die Beschaffung, Reparatur und Wartungskosten.

3.4.2 Materialflusssysteme

Materialtransport: Autoklav Ver- und Entsorgung



Abbildung 3-102: Krananlage

Krananlagen als zwei Trägerbrücken oder Hängekran eignen sich besonders für das Handling schwerer, kompakter Vorrichtungen von 20–30 to.

Nachteile bestehen in der Überkopffahrt, d. h. Sicherheitsaspekte und in der Dimensionierung der Vorrichtung (Biegelinie) bei 2–4 Lastaufnahmen.

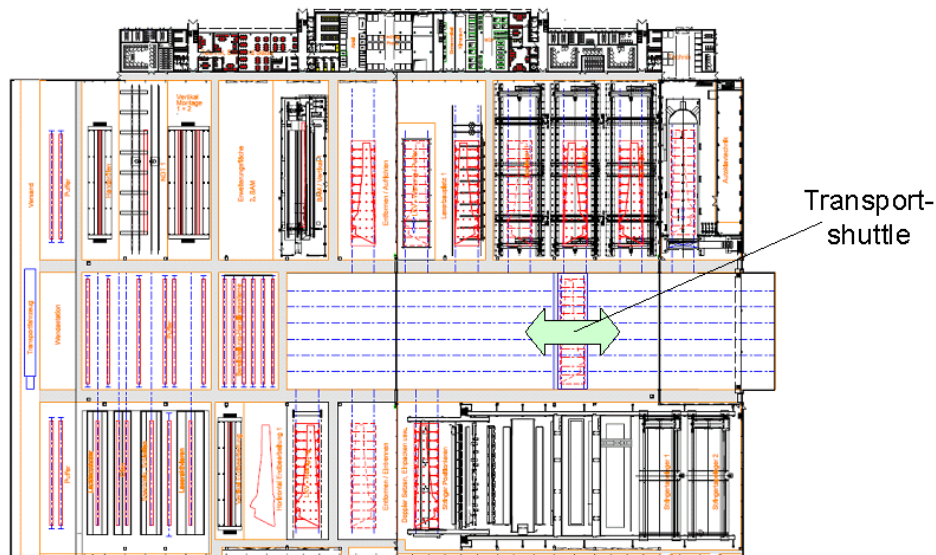


Abbildung 3-103: Shuttlesystem in der A350-Flügelzellenfertigung (Konzept)

Transportshuttle (Abbildung 3-103) ermöglichen schnelle Transportbewegungen, die Vorrichtungen können aufgrund flächiger Unterstützung gewichtsoptimal ausgelegt werden. Der Nachteil liegt im Platzbedarf.

Materialtransport Bauteil



Abbildung 3-104: Lasttraverse für den Transport von großflächigen Bauteilen

Einträger- und Zweiträgerkrane mit zwei Lastaufnahmepunkten und entsprechender Lasttraverse (Abbildung 3-104) bilden ein flexibles Materialflusssystem. Als Lastaufnahmemittel eignen sich Klemm- und Vakuumsysteme (Abbildung 3-105).



Abbildung 3-105: Klemm- und Vakuumaufnahmesystem

Gebäudetrennungen, Schleusen, Brandabschnitte erfordern besondere technische Lösungen. Hier lassen sich wirkungsvoll Transfershuttle (Abbildung 3-106) einsetzen.



Abbildung 3-106: Transfershuttle

Materialflusssystem: Speicher

Entsprechend der Lean-Manufacturing-Ansätze sind Speicherkapazitäten auf ein Minimum zu begrenzen. Prozessspeicher, wie z. B. beim Oberflächenschutz (Abbildung 3-107), sollten flexibel gestaltet werden.



Abbildung 3-107: Materialspeicher im Bereich des Oberflächenschutzes

Die Funktion Fördern und Speichern bildet im Rahmen der Prozessautomatisierung einen wichtigen Beitrag zur Stabilitätsoptimierung ab. Beschädigungen am Bauteil oder innere Schäden durch unzulässige Verformungen werden verhindert und sorgen somit für eine termingerechte Lieferung. Außerdem lassen sich Durchlaufzeiten und Liegezeiten mit den entsprechenden Materialflusssystemen optimal organisieren.

4 Automatisierungsmöglichkeiten in der CFK-Montage zur Komplexitätsreduzierung

4.1 Aufgaben und Ziele der Automatisierung

Wie in Kapitel 2.3.2 bereits aufgeführt, wird die Montage von CFK-Einzelkomponenten insbesondere von den Randbedingungen

- Material, Werkstoffeigenschaften,
- Bauteiltoleranzen und
- Verbindungselementen

bestimmt. Besonders kritisch ist dabei, wie auch in anderen Montageprozessen, die Reproduzierbarkeit der Bauteile sowie die Lage- und Positioniertoleranz des Montagesystems. Die Automatisierung in der CFK-Bauteilmontage stößt immer dann an ihre Grenzen, wenn die Summe aller Einzeltoleranzen die zulässigen Montagetoleranzen überschreitet.

Bei metallischen Strukturen ist dies aufgrund der Maschinen- und Herstellungstoleranzen einfach zu analysieren und zu bestimmen.

In der CFK-Fertigung sind hierzu detaillierte, analytische Untersuchungen erforderlich. Basiert z.B. die Einzelteilherstellung und damit die Fügeflächen auf dem sicheren Einzelteilfertigungsprozess „Freies Aushärten“, d.h. es wurden keine Passleisten oder geometrischen Druckstücke verwendet, so entstehen aufgrund der Oberflächenrauigkeit / Struktur und der unterschiedlichen Schrumpfungsprozesse über die Bauteilstärke Bauteiltoleranzen, die ohne Shimprozess nicht montierbar wären. Liegt die Toleranz in metallischen Strukturen in der Regel bei $\pm 0,2$ mm, so ist die Montagetoleranz in der CFK-Fertigung ohne besondere Vorbereitung der Montageflächen um den Faktor 10, d.h. $\pm 2,0$ mm, höher.

Die Komplexität des Gesamtsystems wird nochmals gesteigert, wenn metallische Strukturelemente (z.B. metallische Rippen) zusammen mit CFK-Komponenten montiert werden. Neben den unterschiedlichen Toleranzsystemen werden in diesem Fall zusätzliche Korrosionsschutzmaßnahmen wie GFK-Lagen zwischen Metall- und CFK-Fläche erforderlich.

Die Automatisierung und damit der Automatisierungserfolg steht deshalb in direkter Abhängigkeit zu der

- montagegerechten Produktgestaltung und den
- Voraussetzungen / Randbedingungen

für einen automatisierten Montageprozess.

Lösungsansätze dazu sollen in den nächsten Kapiteln aufgezeigt werden.

4.1.1 Maßnahmen zur montagegerechten Produktgestaltung

Die Auslegung von montagegerechten Komponenten wird vor allem in der CFK-Fertigung von zwei Leitlinien geprägt:

- Komplexitätsreduzierung und
- Reduzierung der Teileanzahl.

Da in der Regel beide Ansätze nicht gleichzeitig umsetzbar sind, entstehen Konstruktionslösungen, die nachfolgend näher beschrieben werden und je nach Anwendung / Erfordernis einen Kompromiss zwischen den Anforderungen darstellen.

Die Darstellung der unterschiedlichen Bauweisen soll am Beispiel einer Holm-Schalenverbindung analysiert werden.

Bei dieser Verbindung handelt es sich um die Strukturverbindung, die innerhalb einer Torsionsboxkonstruktion die meisten Lasten übernehmen bzw. transportieren muss.

Abbildung 4-1 zeigt den Schnitt durch eine CFK-Torsionsbox am Beispiel eines Seitenleitwerks.

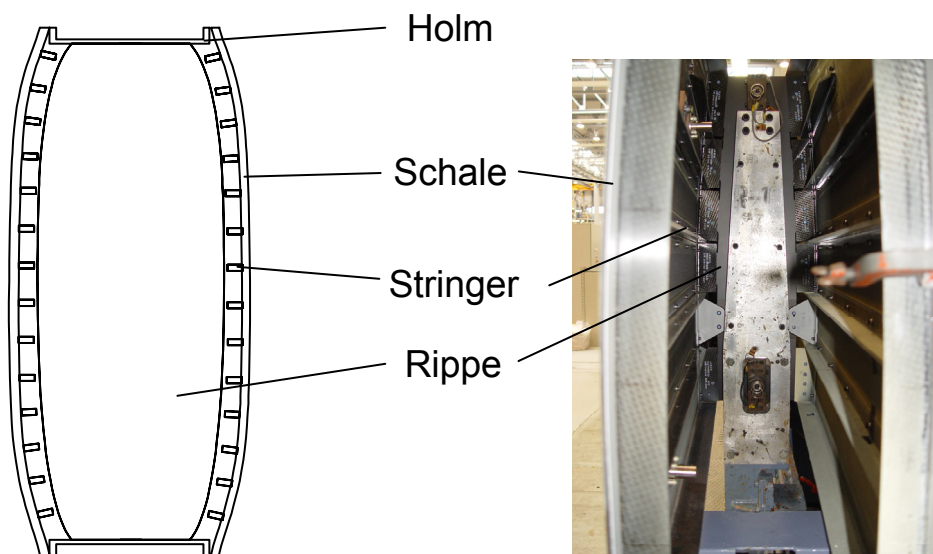


Abbildung 4-1: CFK-Torsionsbox eines Seitenleitwerks

Im nachfolgenden werden 3 Konstruktionsvarianten vorgestellt und beurteilt.

Variante 1

Die Variante 1 stellt die sogenannte aufgelöste Bauweise dar, das heißt alle Einzelteile werden separat hergestellt und mittels Verbindungselementen montiert (Abbildung 4-2).

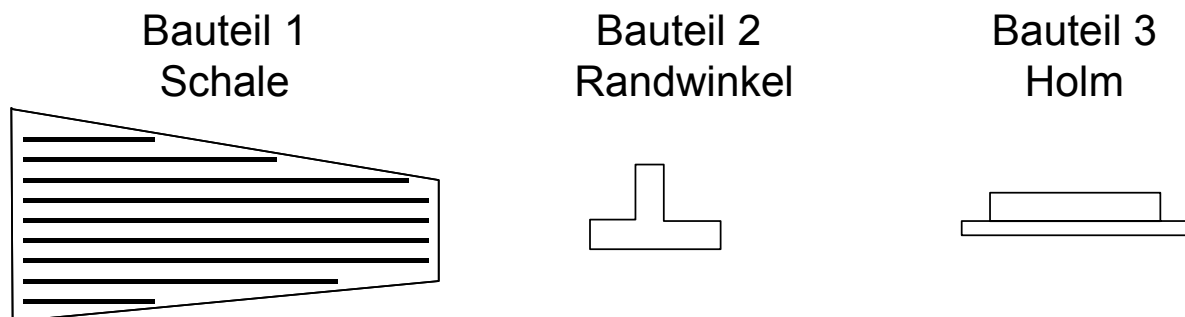


Abbildung 4-2: Einzelteile zur Verwendung bei der aufgelösten Bauweise

Abbildung 4-3 zeigt die Montagesituation im Prinzip sowie am realen Bauteil, einer A400M-Seitenleitwerksbox.

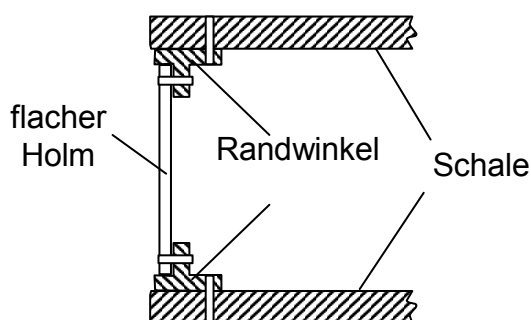


Abbildung 4-3: Montagekonzept bei der aufgelösten Bauweise (Prinzip und A400M-SLW-Box)

Diese Bauweise stellt die maximal mögliche Komplexitätsreduzierung dar, inklusive der folgenden Vor- und Nachteile (Tabelle 4-1).

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Jedes Teil wird einzeln hergestellt. • Unabhängigkeit vom Lieferanten hinsichtlich der Eigen-/Fremdverteilung • Qualität der Einzelteile gewährleistet • Einfache Vorrichtungssysteme • Freies Aushärten aller Einzelteile • Flexibel bei Konstruktionsveränderungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Ausnutzung der CFK-Potenziale wie Klebefügung • Aufwendige Montageprozesse; doppelter Shimprozess

Tabelle 4-1: Vor- und Nachteile einer aufgelösten Bauweise

Variante 2

In Variante 2 wird die Teileanzahl bereits auf zwei Einzelteile reduziert (Abbildung 4-4). Abbildung 4-5 stellt diese Variante im Prinzip dar.

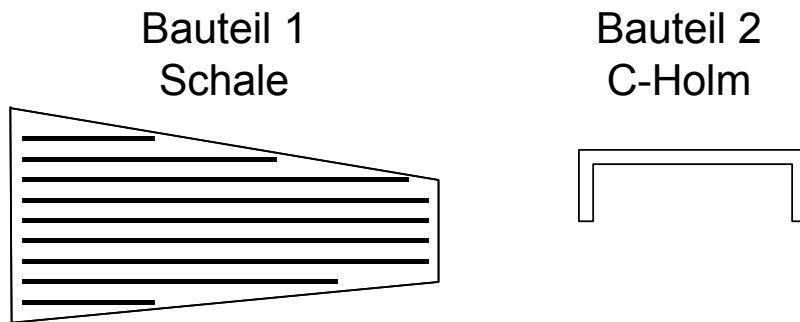


Abbildung 4-4: Einzelteile bei der C-Holm-Bauweise

Die Besonderheiten dieser Bauweise liegen in der passgenauen Herstellung der Fügeflächen zwischen Schale und Holm.

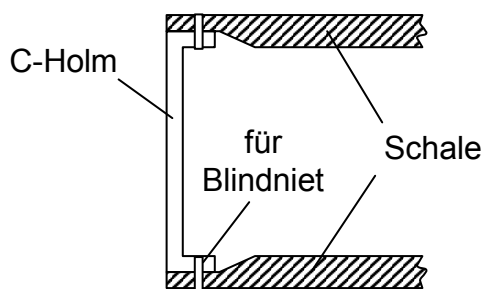


Abbildung 4-5: C-Holm-Konzept

Dies bedeutet, dass die Holmspur (Abbildung 4-6) in der Schale mittels einer Druck- / Randleiste hergestellt wird. Der Holm selber wird in einer positiven Form (siehe Abbildung 4-7) produziert. Dies führt insgesamt zu einem minimalen Shim-Aufwand.



Abbildung 4-6: Holmspur (Quelle: Airbus)



Abbildung 4-7: Positives Holmwerkzeug (Quelle: Airbus)

Darüber hinaus bietet diese Lösung interessante Ansätze für die Niet- bzw. Bolzenverbindungen. So können gemäß Abbildung 4-8 sowohl Blind- als auch Hi-Lok-Verbindungen verwendet werden.

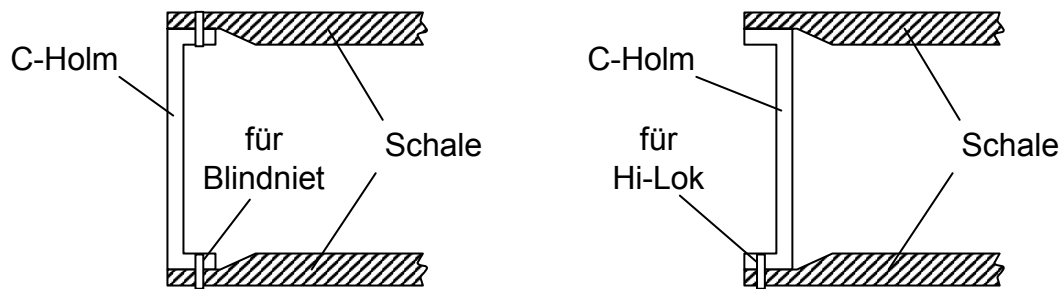


Abbildung 4-8: C-Holm-Anordnung für Blindniet- (links) und Hi-Lok-Verbindung (rechts)

Insgesamt weist das C-Holm-Konzept damit nachfolgende Vor- und Nachteile auf (Tabelle 4-2).

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Passgenaue Herstellung der Einzelteile • Minimaler Shimaufwand • Sehr gute Zugänglichkeit für automatisierte Nietsysteme • Nur ein Montagevorgang Schale / Holm • Teilereduktion auf zwei Stück 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwendiges Werkzeugkonzept (Druckleistsystem für die Schale und C-Form für die Holmvorrichtung) • Komplexe Fertigungstechnologie für die Holmherstellung, da senkrechte Holmflächen im Radius zu Dickenüberschreitungen neigen

Tabelle 4-2: Vor- und Nachteile einer C-Holm-Bauweise

Variante 3

Die Konstruktion und Bauweise der Variante 3 nimmt das Konzept der Variante 1 auf, d.h. es werden 3 Einzelteile separat gefertigt und ausgehärtet (Abbildung 4-9).

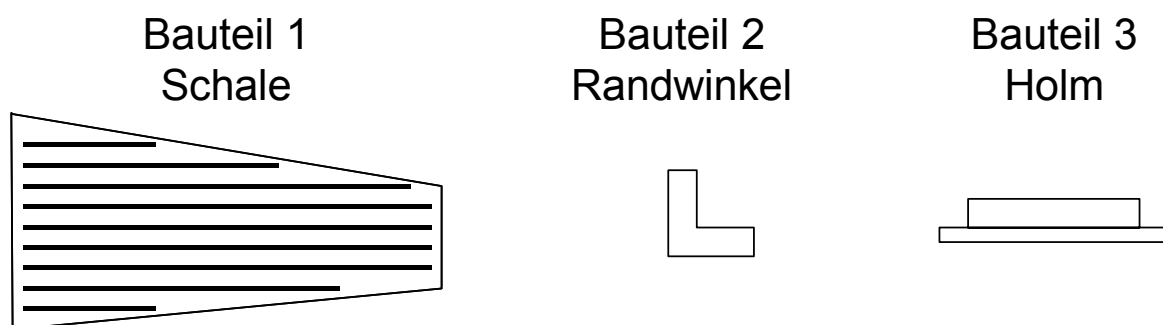


Abbildung 4-9: Einzelteile für das Bauteilkonzept mit integriertem Randwinkel

Allerdings wird der erste Montageprozess, die Verbindung Schale / Randwinkel mittels Co-Bonding⁴¹ im Autoklavzyklus der Schale integriert (Abbildung 4-10).

⁴¹ Co-Bonding bezeichnet das Verkleben einer bereits ausgehärteten CFK-Struktur mit einer unausgehärteten Struktur (Hart-auf-Nass-Technologie)

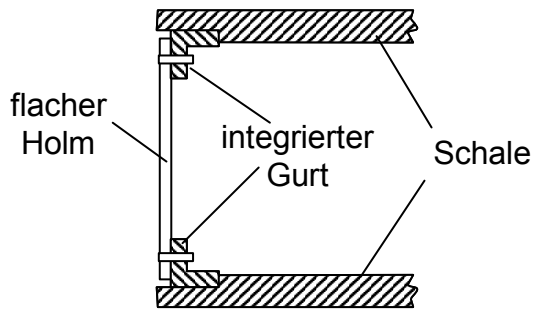


Abbildung 4-10: Montageprinzip mit integriertem Randwinkel

Folgende Vor- und Nachteile kommen dabei zum Tragen, siehe Tabelle 4-3.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Separate Herstellung aller Einzelteile • Eigen- / Fremd-Optimierung möglich • Entfall eines Montageprozesses 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwendiges Werkzeugkonzept der Schale • Zusätzlicher Klebefilm zwischen Randwinkel und Schale • Zugänglichkeitseinschränkungen für automatisierte Nietprozesse • Hi-Lok-Verbindungen nur mittels zusätzlicher Handlöcher im Holm umsetzbar.

Tabelle 4-3: Vor- und Nachteile einer Bauweise mit integriertem Randwinkel

Variante 4

Die Variante 4 zeigt einen vollintegralen Lösungsansatz. Gemäß Abbildung 4-11 werden bei diesem Fertigungskonzept die Einzelteile durch entsprechende Techniken innerhalb eines Autoklavzyklus klebtechnisch integriert.

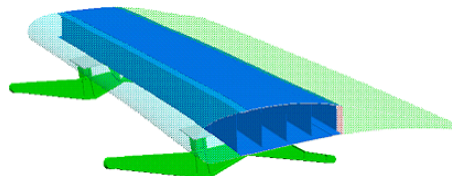


Abbildung 4-11: Vielholmer-Bauteil am Beispiel einer Landeklappe (Quelle: Airbus)

Die Vor- und Strukturmontage entfällt vollständig, wobei sich nachfolgende Vor- und Nachteile zusammenfassen lassen können (Tabelle 4-4).

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Keine Niet- und Bolzenverbindungen • Kurze Durchlaufzeiten in der Montage • Reduzierung der Teilevielfalt auf 1 	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexes Werkzeugkonzept • Keine einzelne Teileaustauschbarkeit • Komplexer Herstellungsprozess • Eingeschränkte Reparaturmöglichkeiten

Tabelle 4-4: Vor- und Nachteile einer voll integrierten Bauweise

Wie in Kapitel 4.1.1 näher erläutert, beeinflusst das Produkt bzw. die Produktgestaltung in erheblichem Maße den erforderlichen Montageprozess. Die aufgezeigten Varianten sollen Lösungsansätze aufzeigen, die gewählte technische Lösung ist allerdings abhängig

- von der Produktionsstückzahl,
- von der statischen Auslegung der Komponenten,
- von den vorliegenden Prozesserfahrungen und
- von der vorhandenen Anlagentechnik.

Eine detaillierte Analyse aller Randbedingungen ist deshalb unabdingbare Voraussetzung für den gewünschten Fertigungsprozess.

4.1.2 Voraussetzungen für das Mechanisieren und Automatisieren von Montagearbeitsgängen

Der Erfolg einer Mechanisierung und Automatisierung in der CFK-Montage beruht auf der Reduzierung der in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Komplexität in den Montageprozessen. Insbesondere die Toleranzsysteme:

- Lagetoleranz und
- Fügetoleranz

bestimmen das Ergebnis einer Automatisierung bzw. den Aufwand einer Automatisierung.

Lagetoleranz

Die Lagetoleranz bestimmt die Positionierqualität der einzelnen Komponenten zueinander. Entscheidend für das Ergebnis ist das gewählte Referenzsystem und der jeweilige Einführungspunkt in die Prozesskette. Besonders wirkungsvoll und nachhaltig ist die Einführung des Referenzsystems im Rohteil.

Abbildung 4-12 zeigt das Einbringen von Systembohrungen nach dem Autoklavprozess über Bohrfalle und Laminiervorrichtung.



Abbildung 4-12: Einbringen einer Systembohrung mit Hilfe einer Bohrfalle (Quelle: Airbus)

Diese in dieser Phase eingebrachten Bohrungen können dann, siehe hierzu auch Kapitel 3.3.1, als Referenzsystem für die folgende geometrische Bearbeitung (Bohren, Fräsen) oder für die Vormontage / Montage verwendet werden.

Abbildung 4-13 zeigt das gewählte Referenzsystem auf einer 5-Achsenbearbeitungsmaschine, Abbildung 4-14 das Referenzsystem in der Vormontage.

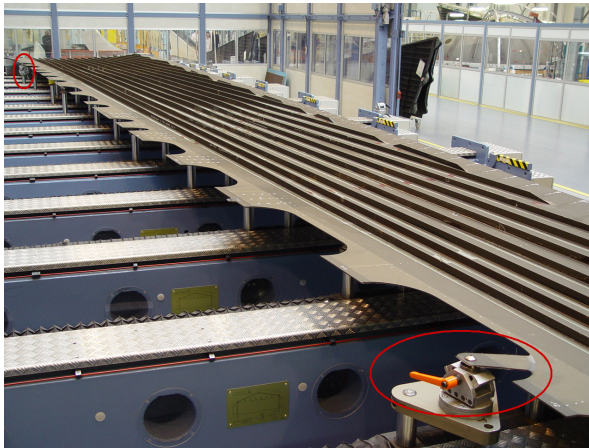


Abbildung 4-13: Referenzsystem einer 5-Achsen-Fräsmaschine (Quelle: Airbus)

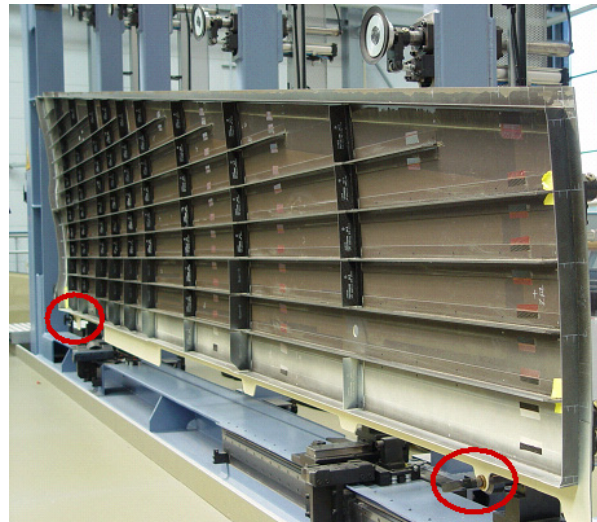


Abbildung 4-14: Referenzaufnahmen in der Vormontage (Quelle: Airbus)

Mit den beschriebenen Verfahren können die Einzelkomponenten in einer Positioniertoleranz von $\pm 0,2$ mm der Strukturmontage zugeführt werden.

Nach dem Abschluss der Montage wird das Hilfs- / Referenzsystem entfernt.

Fügetoleranz

Die Bauteil- oder auch Fügetoleranzen bestimmen in erheblichem Maße den Erfolg einer Automatisierung in der CFK-Montage.

Entsprechend Kapitel 2.3.2.2 müssen in der Montage Toleranzen sowie Spaltmaße von 0,2-3,0 mm überbrückt werden.

Der Einsatz von flüssigem oder festem Shim oder die Kombination aus beiden Verfahren stört den Automatisierungsprozess. Die Folge sind manuelle Eingriffe oder aufwendige automatische Systeme.

Im nachfolgenden sollen drei realisierbare Varianten vorgestellt werden:

Variante 1

Das Vorrichtungskonzept wird so ausgelegt, dass die Fügeflächen über die Vorrichtung bestimmt werden. Abbildung 4-15 zeigt die Vorrichtung eines A380-Holmes. Hier wird die Fügefläche von der Vorrichtung bestimmt und sie liegt damit im Toleranzbereich von $\pm 0,2$ mm.

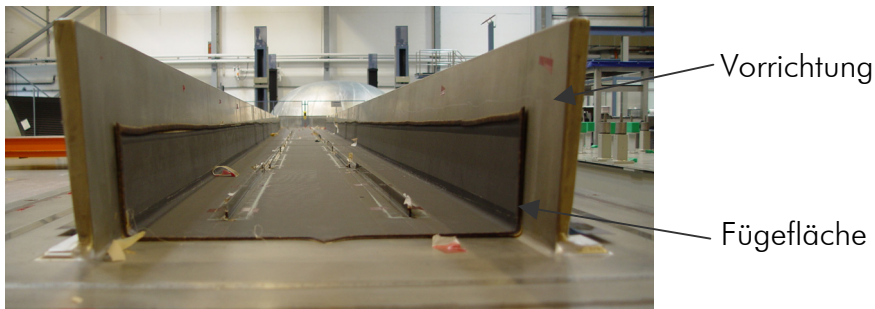


Abbildung 4-15: Werkzeugvorrichtung eines A380-Holmes (Quelle: Airbus)

Variante 2

Das Konzept der Variante 2 basiert auf der Trennung des Einzelteils, hier die Darstellung einer Rippen- / Schalenverbindung (Abbildung 4-16).

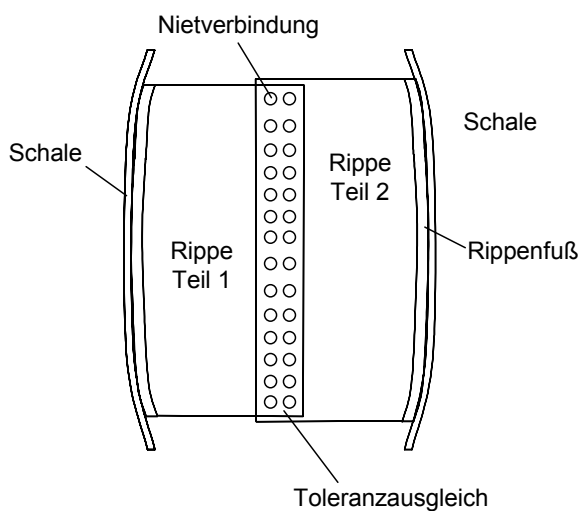


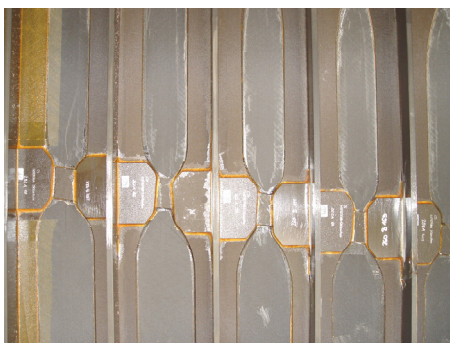
Abbildung 4-16: Trennung des Einzelteils, hier Rippen-/Schalenverbindung

Der Shimaufwand an der Fügefläche wird auf ein Minimum reduziert, der Toleranzausgleich erfolgt mittels Überlappung der Rippenteilkomponenten.

Variante 3

Die Variante 3 beinhaltet die Idee, den Shim bereits im Rohteil einzubauen und den Toleranzausgleich über den mechanischen Bearbeitungsprozess zu erzielen.

Abbildung 4-17 zeigt den Ein- / Aufbau partieller Verschleißplatten an den Fügeflächen.



Schnittbild

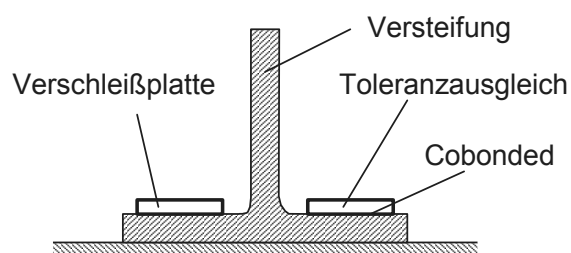


Abbildung 4-17: Verschleißplatten (Quelle: Airbus)

Die Verschleißshimplatten werden über einen Co-Bonding-Prozess eingebracht und dann durch die Fräsmaschine auf das Nennmaß $\pm 0,5$ mm abgefräst.

Neben den geometrischen Randbedingungen bestimmen zusätzlich die Verbindungselemente den Grad der Automatisierung.

Insbesondere die

- Zugänglichkeit,
- Automatisierbarkeit,
- Lastübertragungskennwerte

bestimmen die Auswahl des Nietsystems.

In der CFK-Teilemontage werden in der Regel die Systeme

- Passniet,
- Schraubpassniet und
- Blindniet

verwendet. Die Funktion dieser Verbindungselemente ist in Kapitel 2.3.2.3 näher beschrieben. Die dort beschriebene Einschränkung zeigt auf, dass das Setzen von Schraubpassnieten aufgrund der Nietmontagetoleranz derzeit nicht automatisierbar ist.

Für die automatisierte Montage eignet sich am besten der Blindniet. Die einseitige Zugänglichkeit ermöglicht optimale Automatisierungsverhältnisse.

Allerdings ist das Leistungsvermögen dieser Nietsysteme heute noch nicht mit den Kennwerten der Pass- oder Schraubniete vergleichbar. Tabelle 4-5 zeigt den Vergleich einiger Kennwerte.

Niettyp	Durchmesser in mm	Nietstärke in N	
		Scherung	Spannung
		S / N	T / N
Blindniet (Blind rivet)	4,14	7000	4000
Passniet (Lock-Bolt)	4,14	8880	7310
Schraubpassniet (Hi-Lok)	4,14	8918	9697

Tabelle 4-5: Kennwerte einiger ausgewählter Niettypen

Diese konstruktiven Randbedingungen führen zu unterschiedlichen technischen Automatisierungslösungen, die im Folgenden näher erläutert werden.

4.2 Automatisierung der Funktion Vormontage

Die Automatisierungsmöglichkeiten in der Vormontage sollen in diesem Kapitel am Beispiel einer A320-Seitenleitwerksschale aufgezeigt werden. Das dargestellte Anlagenkonzept wurde 2003 initiiert und 2005 erfolgreich in die Serienfertigung überführt.

Die Aufgabenstellung beinhaltete die Herstellung aller Nietverbindungen mittels Passniet (Lock-Bolt).

Abbildung 4-18 zeigt das Bauteil vor und nach der Bearbeitung.

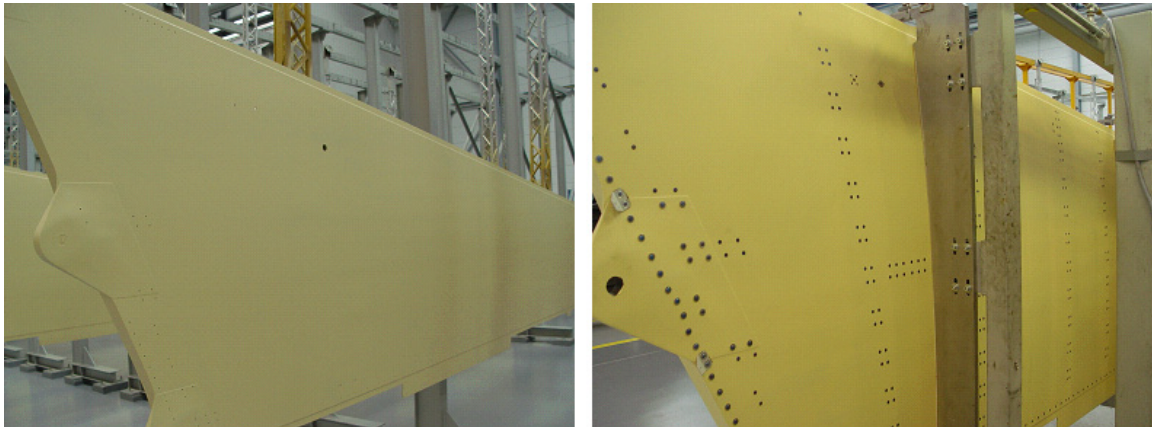


Abbildung 4-18: Seitenleitwerksschale vor und nach dem Vormontageprozess

Im einzelnen mussten folgende Verbindungen hergestellt werden:

- Clip/Tie – Schale,
- Stringer – Schale,
- 457 Bohrungen,
- 439 Nietverbindungen.

Insgesamt besteht die Varianz der Nietverbindung aus 2 verschiedenen Nietdurchmessern mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Nietlängen.

Trotz der extremen Positioniertoleranz von $\pm 0,2$ mm für den Collar-Setzprozess wurden zwei Standardrobotersysteme beschafft.

Die von der Firma Hydro Control Steuerungstechnik GmbH gelieferte Anlage basiert auf folgenden Komponenten. Abbildung 4-19 zeigt die reale Anlage, Abbildung 4-20 die Anlagenkonzeption.



Abbildung 4-19: Anlage zur Vormontage von SLW-Schalen /15/

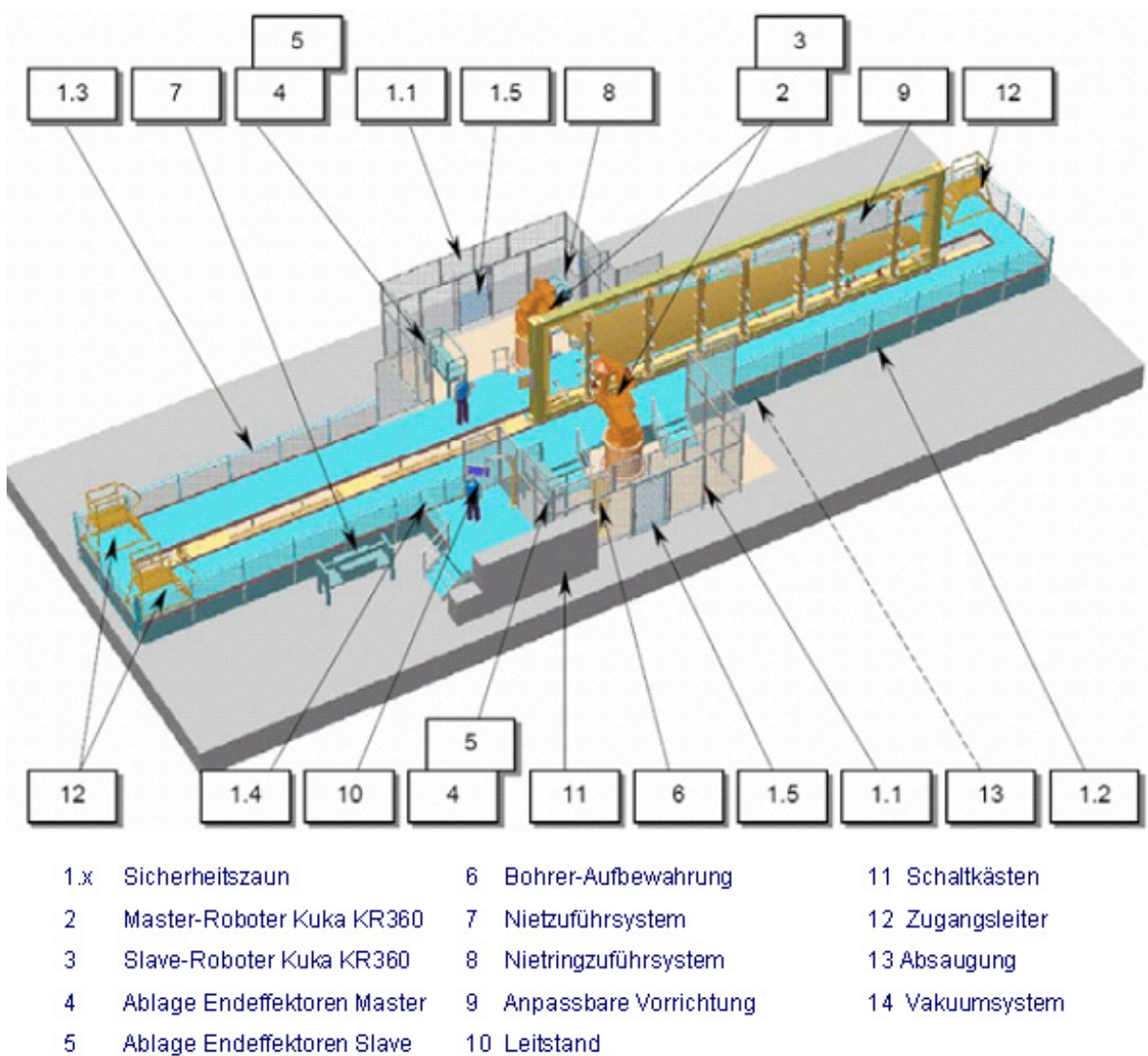


Abbildung 4-20: Anlagenkonzept /15/

Das Grundkonzept der Anlage basiert auf zwei Knickarmrobotern (siehe Abbildung 4-21).



Typ: Kuka KR 360/2

6-Achsenroboter

Zuladung: 240 kg

Gewicht: 2375 kg

Reichweite: 3.076 mm

Ausstattung:

- vollautomatische Werkzeugkupplung für den Wechsel der Endeffektoren
- Temperatur- und dynamische Lastenkompensation

Abbildung 4-21: Eingesetzte Roboter /15/

Beide Roboter arbeiten nach dem Master-/Slave-Prinzip⁴², d.h. es erfolgt alle 250 ms eine Synchronisation der Position beider Roboter. Der Master-Roboter gibt dabei die Position vor und der Slave-Roboter justiert sich automatisch nach.

Voraussetzung für diese Funktion ist eine Positioniertoleranz beider Anlagen im Bereich $\pm 0,2$ mm. Die gewählten Standardroboter erreichen ohne Kompensation eine Positioniertoleranz von 2,5 mm in Abhängigkeit des Schwenkradius, siehe hierzu Abbildung 4-22.

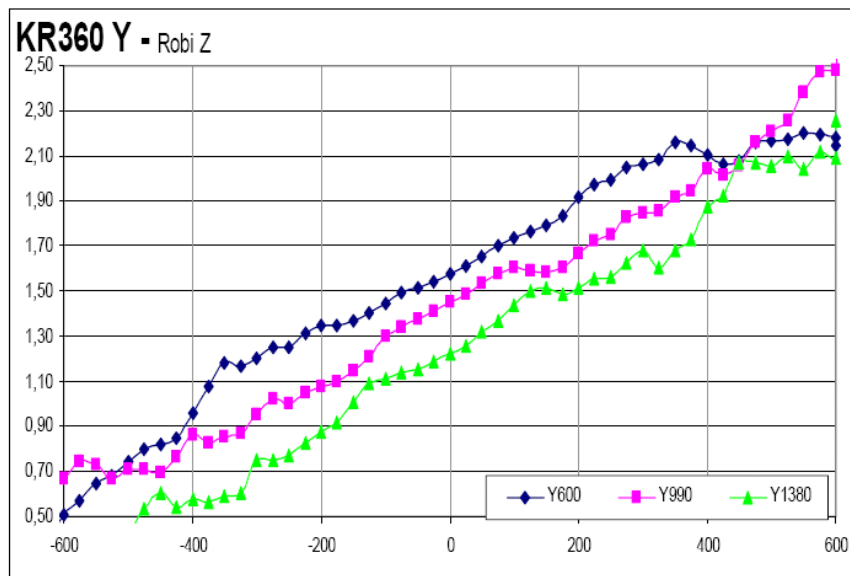


Abbildung 4-22: Positioniertoleranz in Abhängigkeit vom Schwenkradius /15/

⁴² Master-/ und Slave-Roboter sind miteinander gekoppelt und führen alle Aktionen in gegenseitiger Abstimmung aus.

Mit einer entsprechenden Lasermessung und gleichzeitiger geometrischer Kompensation lassen sich die Abweichungen gemäß Abbildung 4-23 auf eine Toleranzbreite von $\pm 0,2$ mm reduzieren.

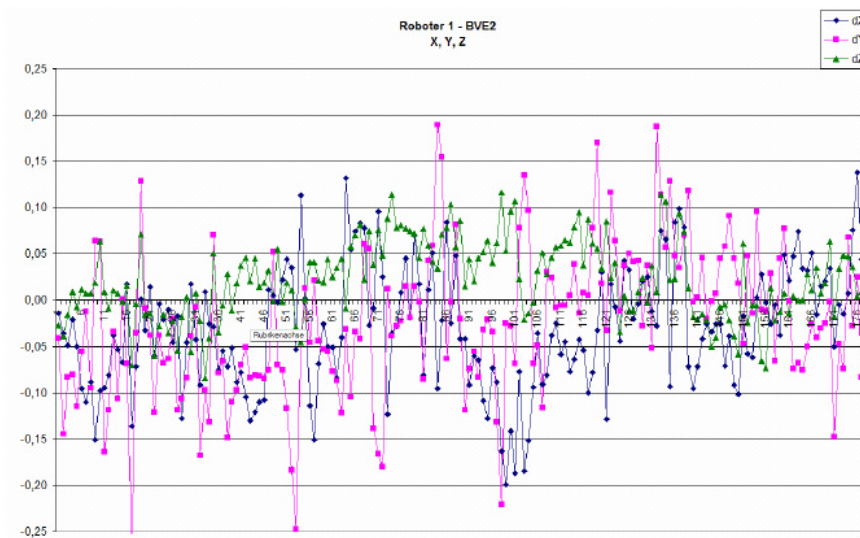


Abbildung 4-23: Toleranzreduzierung durch Kompensationsmaßnahmen /15/

Bei der Inbetriebnahme der Anlage wurde aber schnell erkennbar, dass die eingestellte Kompensation für den Praxisbetrieb nicht ausreichend ist.

Da die Anlage in einem nicht klimatisierten Hallenbereich zur Anwendung kommen sollte, spielte die Temperaturdifferenz ($\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$) in der Halle bzw. in der Anlage eine entscheidende Rolle.

Abbildung 4-24 zeigt die Abweichung in mm ohne und mit Temperaturkompensation (TK). Die dargestellte Abweichung basiert auf einer Temperaturabweichung von $3,5$ - $4,9^\circ\text{C}$ zur Basistemperatur (20°C).

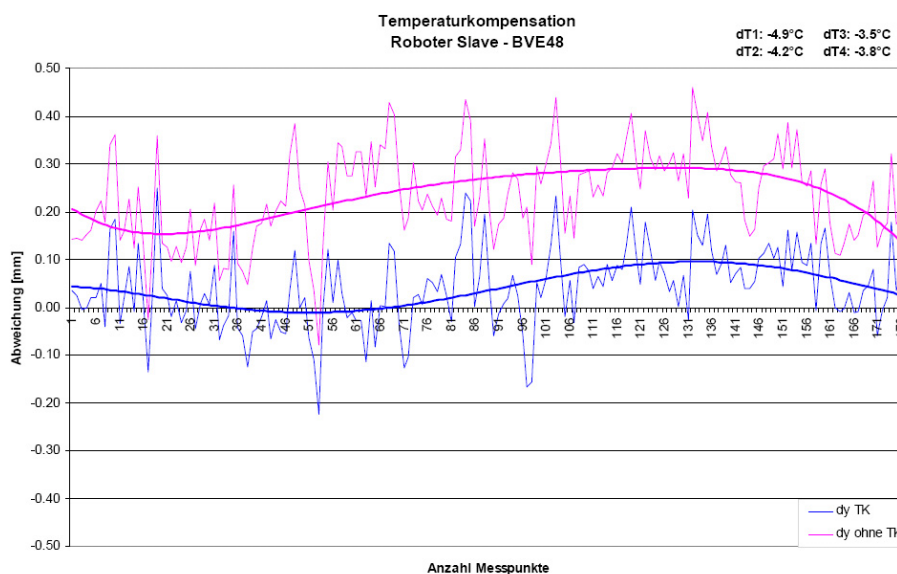


Abbildung 4-24: Abweichung mit und ohne Temperaturkompensation /15/

Der Einsatz von handelsüblichen Robotern ist somit ohne Messsystemkompensation und Temperaturkompensation für den automatischen Bearbeitungsprozess in der Toleranzgüte von $\pm 0,2$ mm nicht realisierbar.

In Zusammenarbeit mit der Firma Hydro Control wurden umfangreiche Messreihen analysiert und ausgewertet.

Das gewählte Kompensationsverfahren basiert auf verschiedenen Temperaturfühlern (4 Stück), die an den Maschinenkomponenten montiert werden sowie einer speziellen Software, die im kontinuierlichen Zyklus eine Längenkompensation vornimmt.

4.2.1 Funktionsprinzip der Automatisierung

Wie bereits beschrieben, arbeitet die Anlage mittels zwei 6-Achsenrobotern nach dem Master-/Slave-Prinzip. Die Aufgabenstellung beider Roboter gliedert sich entsprechend in drei Funktionsbereiche:

- Werkzeug-/Vorrichtungjustierung,
- Bauteilvermessung und Bohrprozess,
- Installation der Verbindungselemente.



Abbildung 4-25: Aufgabenverteilung zwischen Master- und Slaveroboter /15/

Voraussetzung für die Umsetzung aller Funktionen ist der Einsatz verschiedener Endeffektoren und einer flexiblen, automatisierbaren Schnittstelle zum Roboter.

Abbildung 4-26 zeigt die ausgeführte Schnittstellen mit allen erforderlichen Medien wie Strom, Druckluft, Hydraulik, Absaugung, Datenschnittstelle und Zentrier- sowie Verriegelungselemente.

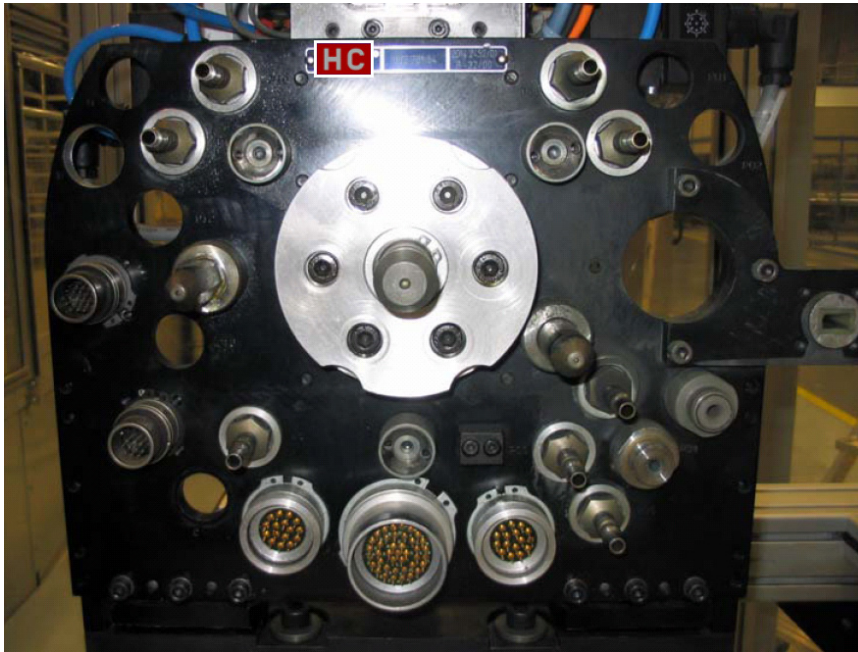
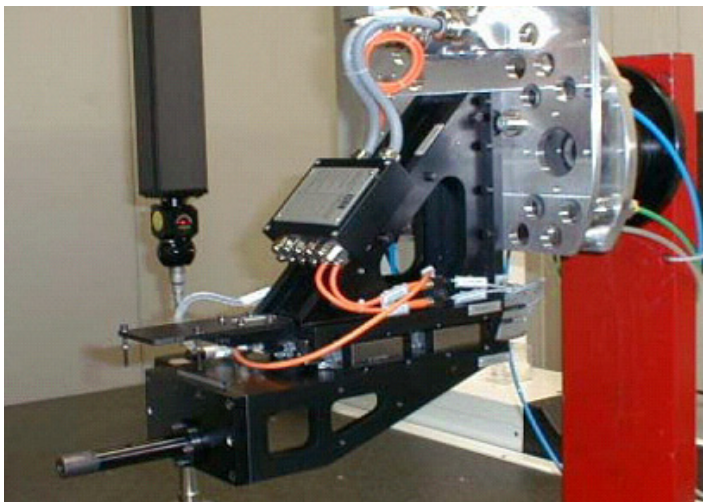


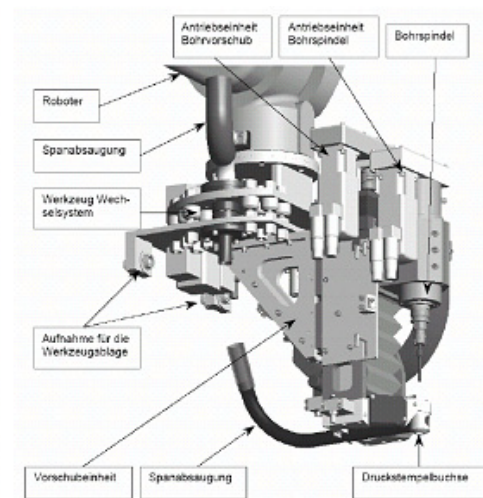
Abbildung 4-26: Endeffektoren-Schnittstelle /15/

Im Nachfolgenden sollen die eingesetzten Endeffektoren kurz vorgestellt werden (Abbildung 4-27 bis Abbildung 4-30).



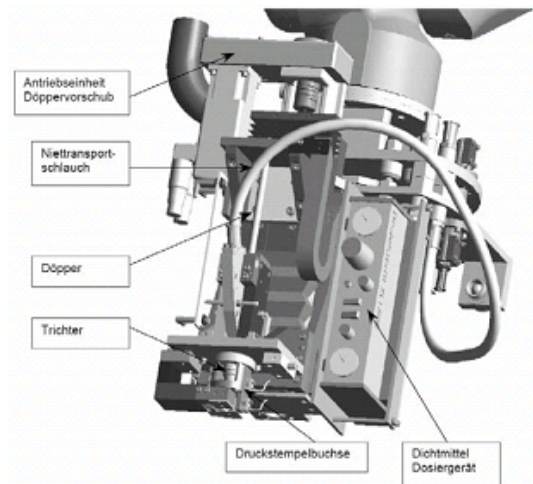
- Lasermesskopf für die Clip-/ Stringerlage
- Vakuumabsaugung
- Gegenhalter

Abbildung 4-27: Messendeffektor /15/

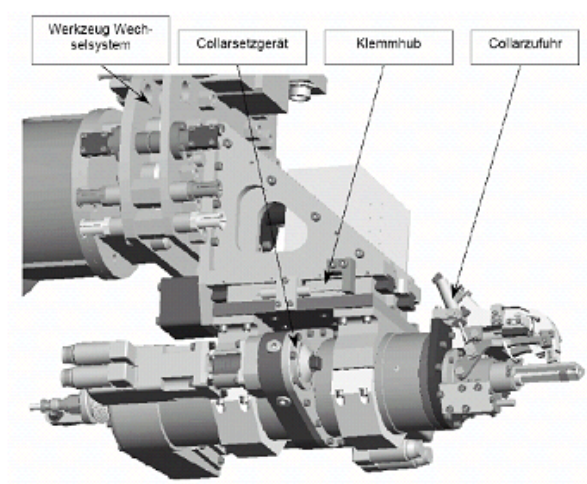


- Bohrkopf mit Spindel
- Spanabsaugung
- Druckstempelbuchse

Abbildung 4-28 Bohrendeffektor /15/



- Nietsetzkopf
- Dichtmitteldosiergerät
- Druckstempelbuchse



- Collarsetzkopf
- Stiftrückführung

Abbildung 4-29: Nietsetzendeffektor /15/

Abbildung 4-30: Endeffektor zum Setzen der Nietringe /15/

Unterstützt wird der Bearbeitungsprozess von einigen Haupt- und Peripheriekomponenten.

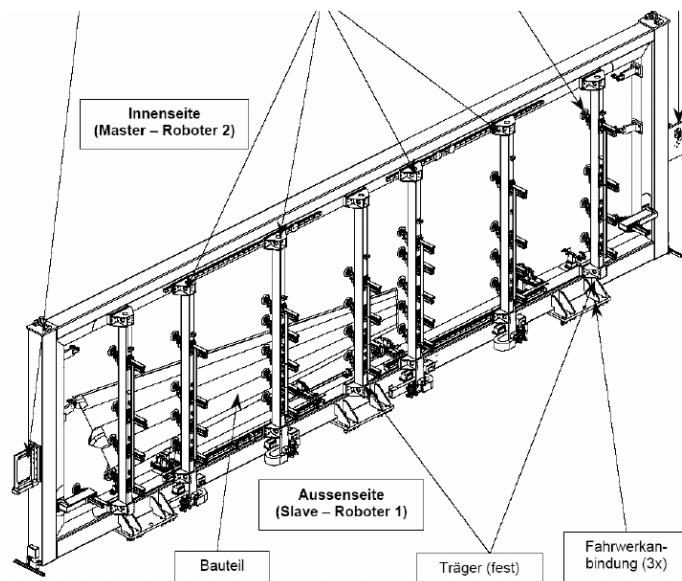


Abbildung 4-31: Flexible Bauteilvorrichtung /15/

Die flexible Vorrichtung (Abbildung 4-31) besteht aus sieben Spannbrücken, wovon vier Brücken einstellbar sind. Das Spannsystem ist für die flexible Aufnahme von zwei verschiedenen Grundformen mit links/rechts-Geometrie vorgesehen.

Abbildung 4-32 zeigt die automatisch ansteuerbaren Lagerplätze der Endeffektoren.

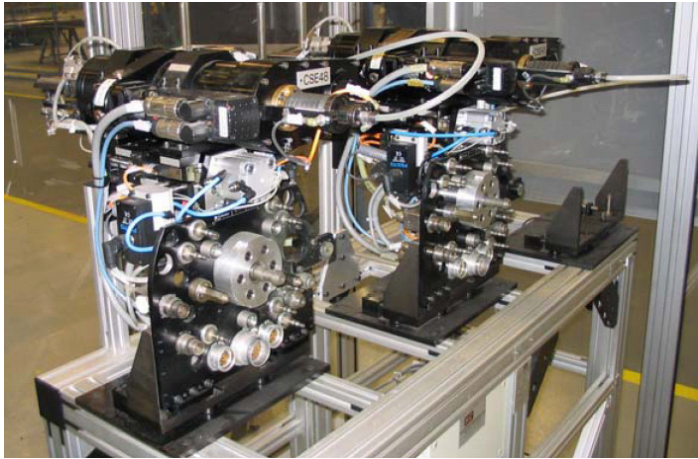


Abbildung 4-32: Lagerplätze der Endeffektoren /15/

Das Werkzeuglager mit 20 Werkzeugpositionen ist in Abbildung 4-33 dargestellt.



Abbildung 4-33: Werkzeuglagersystem /15/

Abbildung 4-34 zeigt das ausgewählte Nietauswahlssystem mit 16 verschiedenen Nietzuführbehältern.

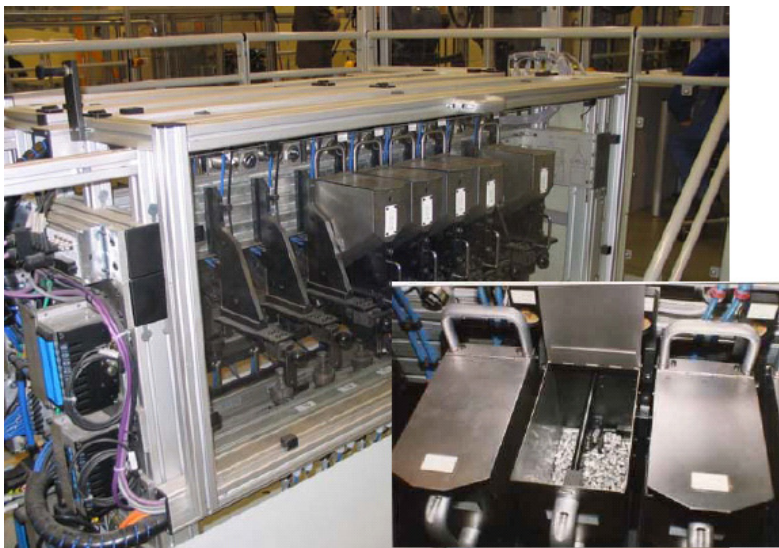


Abbildung 4-34: Nietauswahlssystem /15/

Für die Bereitstellung der Nietringe (Collar) wird ein Vibrationsauswahlssystem gemäß Abbildung 4-35 eingesetzt.

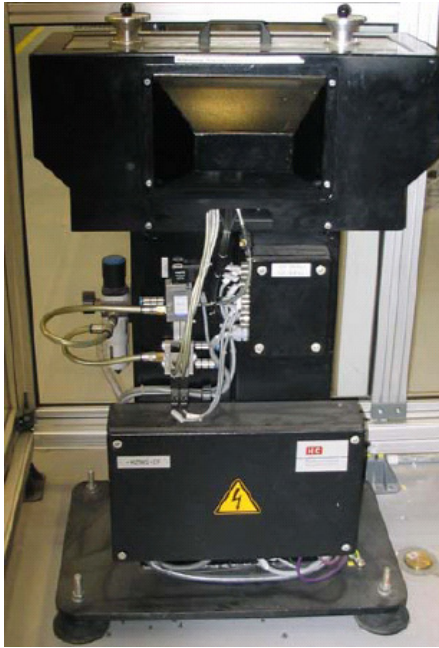


Abbildung 4-35: Vibrationsauswahlssystem /15/ Abbildung 4-36: Passniet (Lockbolt) und Nietring (Collar)

Alle Anlagenkomponenten werden über ein integriertes Zellenkontrollsystem miteinander verbunden und gesteuert. Die Geometriedaten werden über Catia V4/V5 eingelesen und offline verarbeitet.

4.2.1.1 Konfiguration der Vorrichtung

Das Einstellen der Vorrichtung erfolgt in zwei Schritten:

1. Schritt: Voreinstellung der flexiblen vier variablen Querträger,
2. Schritt: Höheneinstellung der Vakuumsauger.

Nachdem die Querträger mittels NC-Programm eingestellt sind, wird über den Master-Roboter und den Endeffektorgegenhalter jeder Vakuumsauger auf Höhe eingestellt. Dies geschieht durch das exakte Positionieren des Gegenhalters und das Ausfahren der Vakuumsauger über einen Druckluftzylinder an den Gegenhalter sowie das automatische Klemmen des Vakuumsaugers.

Dies wiederholt sich je nach Bauteilform und -größe bis zu einer Gesamtzeit zwischen 10-15 Minuten.

Nach erfolgreicher Voreinstellung kann das Bauteil über das Referenzsystem abgesteckt, gespannt und in die Anlage eingefahren werden.

4.2.1.2 Messen und Bohren des Bauteils

Die Kernfunktion der Anlage ist die Verbindung zwischen Tie und Stringer.

Jeder Tie wird dabei mit vier Nieten auf dem Stringerfuß befestigt (siehe hierzu Abbildung 4-37).

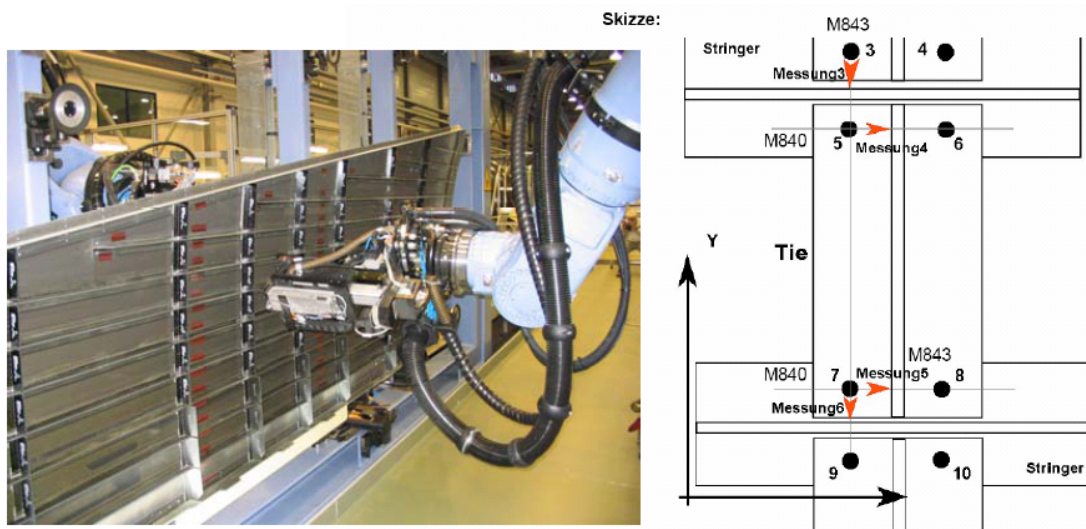


Abbildung 4-37: Setzen der Ties sowie Anfahren der Position /15/

Aufgrund der Positioniertoleranz der Stringer von $\pm 1,0$ mm ist ein Bohren und Nieten dieser Verbindung in einer Randabstandstoleranz von $\pm 0,2$ mm nicht realisierbar.

Die manuell mit Shim gesetzten Ties werden deshalb mit einem speziellen Lasermesssystem (Abbildung 4-27) des Master-Roboters vermessen. Dies geschieht gemäß Abbildung 4-37 über das Anfahren der Tie und Stringerstege.

Die Ist-Daten werden dann verrechnet und als NC-Datensatz dem Slave-Roboter zur Verfügung gestellt.

Im nächsten Arbeitsschritt führt dann der Slave-Roboter mit dem Bohrendeffektor (Abbildung 4-28) den eigentlichen Bohrvorgang durch. Dabei wird der Bohreraustritt durch einen Gegenhalter des Master-Roboters abgesichert. Absplitterungen am Bohraustrittsloch werden somit vermieden.

4.2.1.3 Setzen der Niete

Eine besondere technische Herausforderung in der CFK-Nietmontage ist die Bestimmung der Nietlänge.

Im Gegensatz zu metallischen Verbindungen lassen sich die Nietlängen theoretisch nicht bestimmen. Schrumpfungsprozesse etc. erfordern die Erfassung der realen Nietlänge am Bauteil nach dem Bohrprozess.

In Zusammenarbeit mit der Firma HC-Hydro Control wurde deshalb ein Konzept zur Längenbestimmung über die Drehmomentenkurve der Spindel entwickelt.

Abbildung 4-38 zeigt das Moment (Nm) über die Zeit (s) bzw. den Weg.

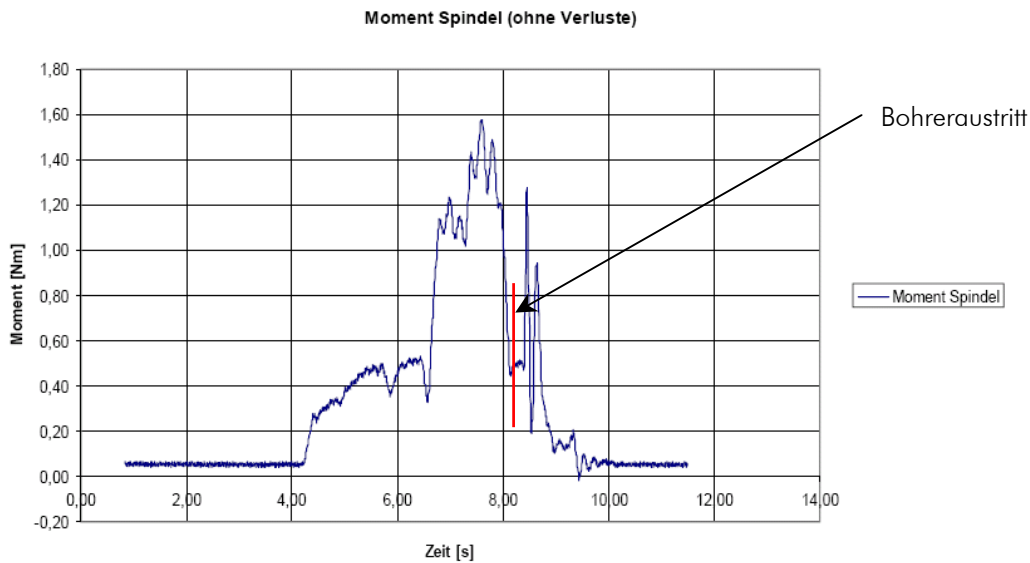


Abbildung 4-38: Längenbestimmung über die Drehmomentenkurve /15/

Mit dem Austritt des Bohrers sinkt das Drehmoment (siehe Markierung in Abbildung 4-38), dieser Punkt wird zur Nietlängenbestimmung verwendet und dem Leitrechner für die Auswahl des entsprechenden Nietes zur Verfügung gestellt.

Für den eigentlichen Nietvorgang wird im Slave-Roboter der Nietkopf- (Abbildung 4-30) und im Master-Roboter der Nietsetzendeckeffektor (Abbildung 4-30) eingesetzt.

Der Prozess beginnt mit dem Einspritzen des Dosiermittels, anschließend wird der vorher ausgewählte Niet über das Nietauswahlssystem zugeführt und gesetzt (Abbildung 4-39).

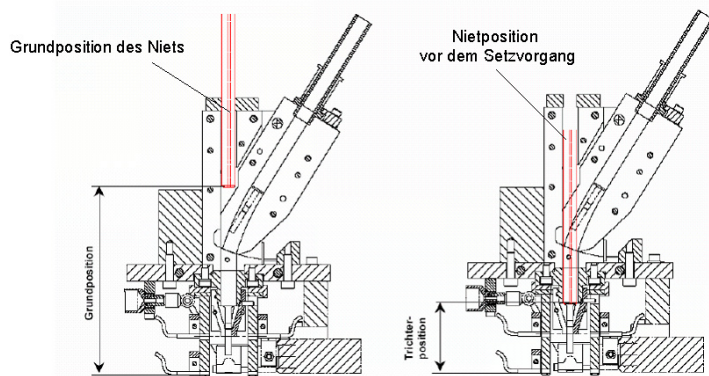


Abbildung 4-39: Setzen des Nietes /15/

Danach erfolgt das Einfädeln des Collar, das Spannen des Nietes und das gleichzeitige Klemmen des Collar. Der Nietprozess endet mit dem Abriss des Stiftes. Dieser wird dann automatisch der Entsorgung zugeführt.

Das Gesamtsystem hat bis heute (Juli 2007) über 500 Schalensets (links/rechts) erfolgreich bearbeitet.

Für die Bearbeitung einer A320-SLW-Schale werden dabei ca. 3,5 Stunden pro Bauteil aufgewendet.

4.3 Automatisierung der Funktion Strukturmontage

Entsprechend Kapitel 2.3 sowie Abbildung 2-13 baut die Strukturmontage auf dem Montageprozess Vormontage auf. Entsprechend der Montagestrategie ist in einzelnen Strukturmontagelinien die Vormontage Bestandteil dieses Prozesses, bzw. wird hauptzeitparallel durchgeführt.

Am Beispiel der A380-Seitenleitwerksmontage sollen die Automatisierungsmöglichkeiten einer Strukturmontage, hier am Beispiel einer CFK-Torsionsbox (Abbildung 4-40), näher beschrieben werden.

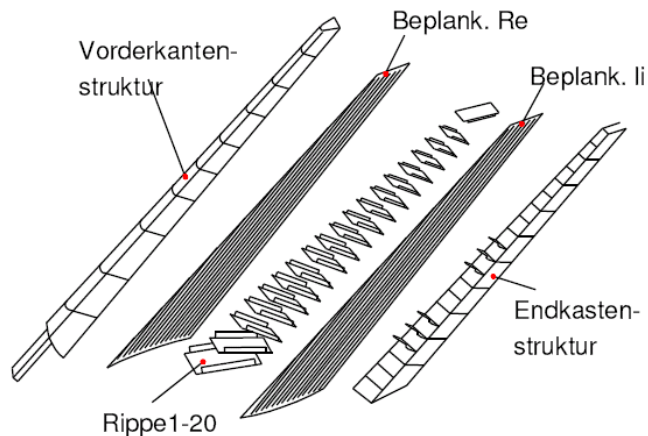


Abbildung 4-40: Aufbau einer CFK-Torsionsbox

Der Automatisierungsgrad ist dabei gesteuert von der Stückzahl/Monat bzw. von der geforderten Technologie, d.h. Toleranz, Dimension und Nietsystem.

4.3.1 Funktionsprinzip der Automatisierung

Das Funktionsprinzip der A380-SLW-Montage basiert auf dem in Abbildung 4-41 dargestellten Materialfluss sowie Layoutkonzept und auf den abgebildeten Montagestationen.

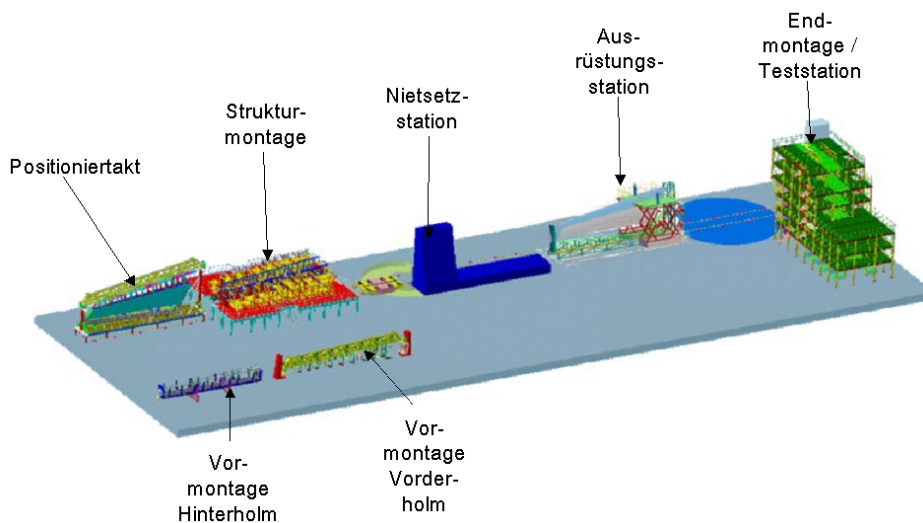


Abbildung 4-41: Prinzipbild der A380-SLW-Montage (Quelle: Airbus)

Der Anteil an Eigen- und Fremdleistungen teilt sich dabei entsprechend der nachfolgenden Abbildung 4-42 auf.

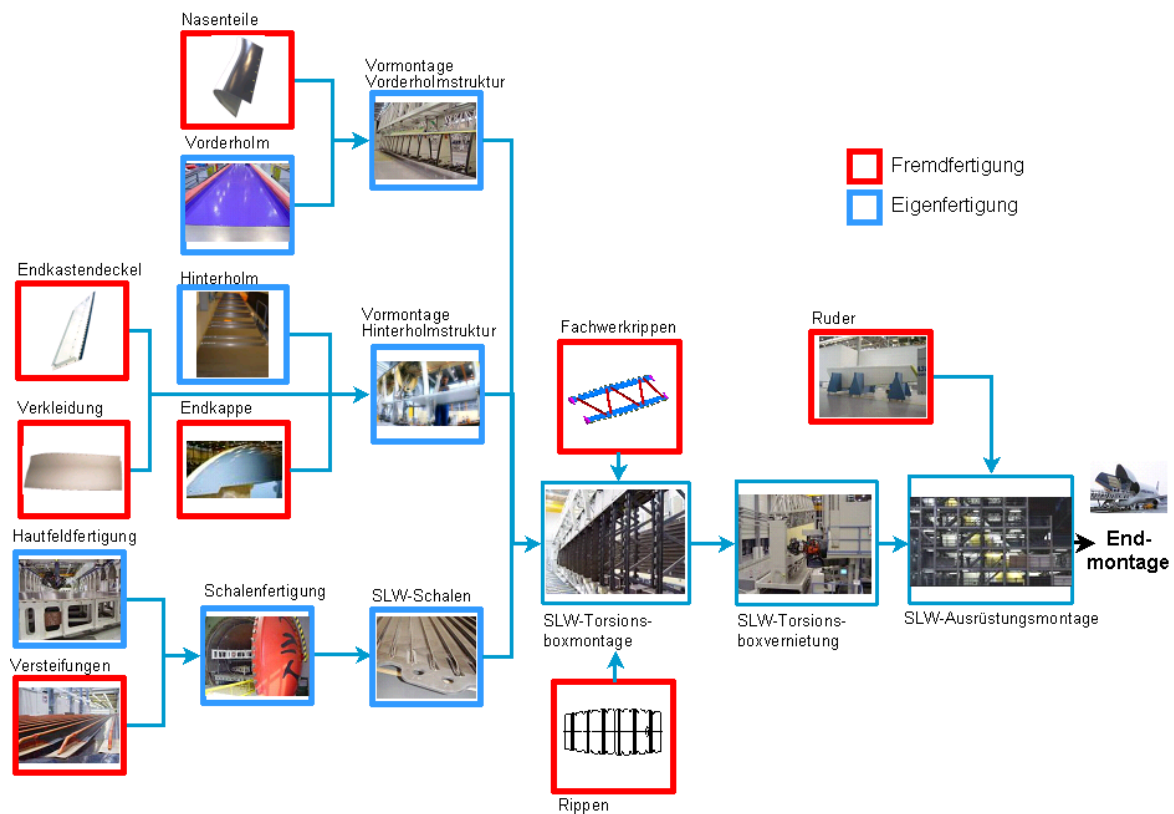


Abbildung 4-42: Eigen- und Fremdfertigung in der A380-Seitenleitwerksfertigung (Quelle: Airbus)

4.3.1.1 Vormontage Vorder-/Hinterholm

Der Vorder- und Hinterholm wird in einem separaten Montageplatz vormontiert (Abbildung 4-43 und Abbildung 4-44). Dies erfolgt hauptzeitparallel von der Strukturmontage.

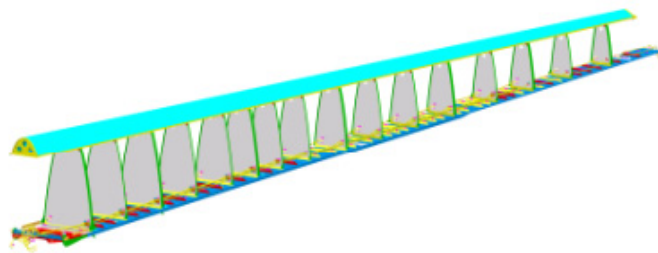


Abbildung 4-43: Vorderholm-Vormontage eines A380-Seitenleitwerks (Quelle: Airbus)

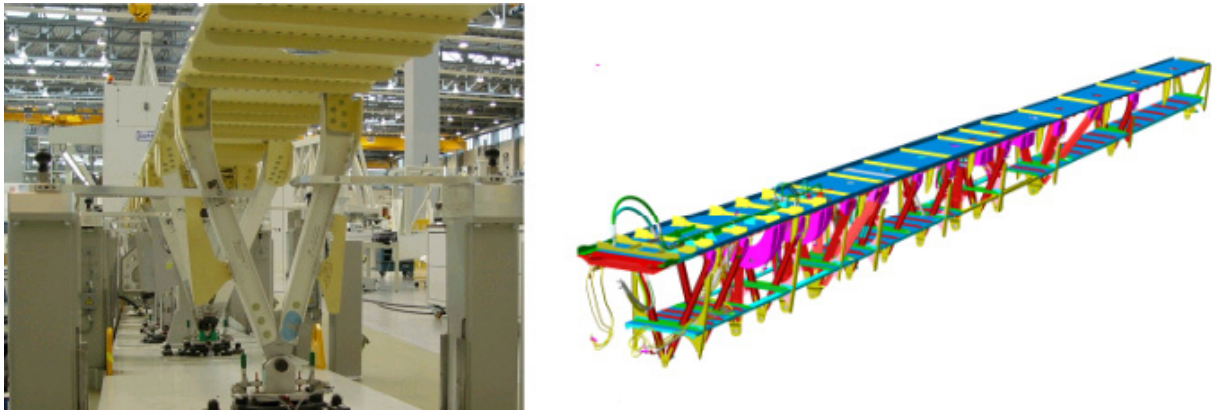


Abbildung 4-44: Hinterholm-Vormontage eines A380-Seitenleitwerks (Quelle: Airbus)

Als Montageelement bzw. Strukturelement werden Traversensysteme des flexiblen Box-Montagegerüsts verwendet. Mit Abschluss der Vormontage werden die Komponenten mittels Kran dem Positioniertakt zugeführt. Abbildung 4-45 zeigt die Transferpalette mit der Untertraverse/Hinterholm und der Obertraverse/Vorderholm.

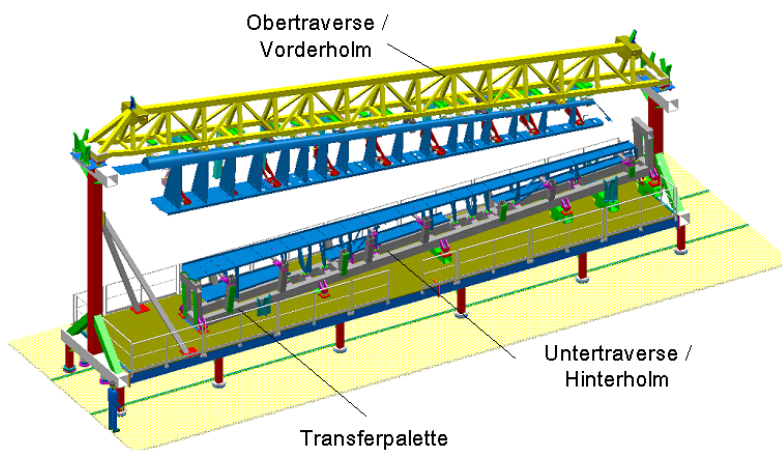


Abbildung 4-45: Transferpalette mit Unter- und Obertraverse (Quelle: Airbus)

4.3.1.2 Strukturmontage

Nach dem Aufrüsten des Vorder- und Hinterholms wird die Transferpalette mit Hilfe eines bodengeführten Shuttles (Abbildung 4-46) in die Strukturmontagestation eingefahren. Diesem Arbeitsgang folgt das Einsetzen der Rippen und das Vernieten der Holm-/Rippenverbindung (Abbildung 4-47).



Abbildung 4-46: Bodengeführter Shuttle in der A380-SLW-Montage (Quelle: Airbus)

Die für das Schließen der Box erforderlichen Seitenschalen befinden sich in einer konturgenauen Schablone jeweils rechts und links vom Holm-/ Rippengerüst (siehe hierzu auch und Abbildung 4-48).



Abbildung 4-47: Holm-Rippengerüst sowie in die Konturschablone eingelegte Seitenschale (A380) (Quelle: Airbus)

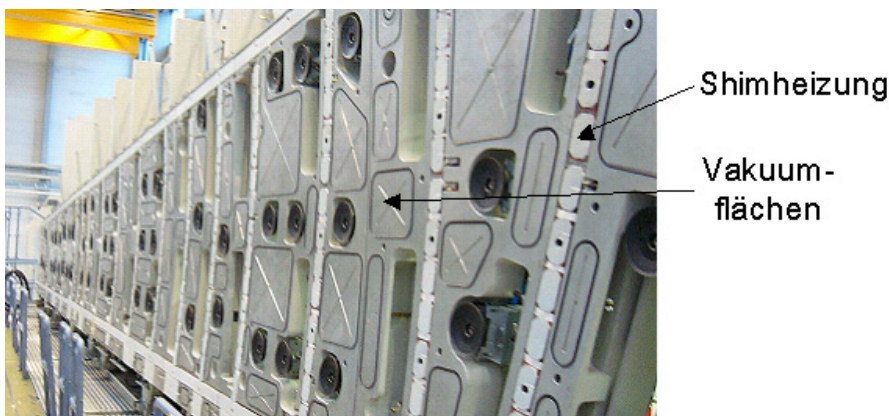


Abbildung 4-48: Konturschablone (Quelle: Airbus)

Zur Überbrückung der Montagetoleranzen werden die Schalen abwechselnd an das Holm-/Rippengerüst gefahren. Der Montagespalt pro Position wird ermittelt und mit flüssigem oder festem/flüssigem Shim vorbereitet, d.h. es wird eine dem Spaltmaß angepasste Menge auf die Fügefläche aufgebracht.

Jetzt erfolgt das parallele Zusammenfahren beider Schalen bis zur Sollposition. Um den Aushärtungsprozess des Shim zu verkürzen, in der Regel sind hierzu 5-8 h bei Raumtemperatur erforderlich, wird eine elektrische Heizung eingesetzt. Hierdurch lässt sich eine Prozesszeitreduzierung von über 50% umsetzen.

Mit Abschluss des Shimprozesses wird die Box nochmals geöffnet und die Fügestellen gereinigt (überflüssiger Shim wird entfernt).

Bevor das Shuttle das Bauteil inklusive Transferpalette aus der Station fährt, werden beide Seitenschalen wieder zur Box zusammengefügt.

Danach werden die Komponenten mittels Heft- und Referenznieten gefügt und somit für den Transportvorgang und die Nietstation vorbereitet.

4.3.1.3 Nietsetzstation

Bei der verwendeten Nietsetzstation handelt es sich um eine Nietsetzanlage der Fa. Brötje Automation. Die installierte Anlage gemäß Abbildung 4-49 basiert auf den Anlagenkomponenten

- Positionierer
- Endeffektoren
- Nietauswahlsystem.

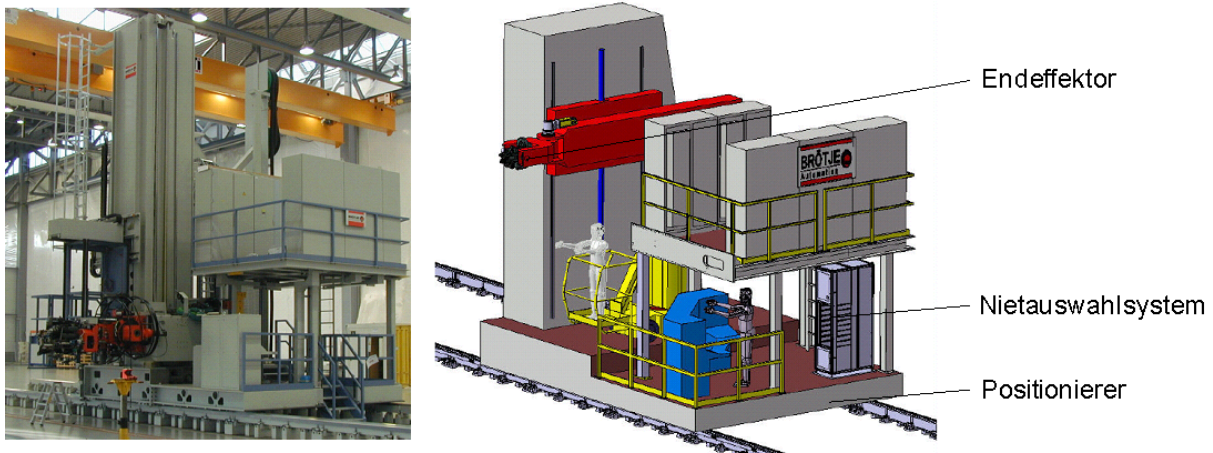


Abbildung 4-49: Nietsetzanlage der Fa. Brötje /6/

Zur Anpassung an die Produktionsrate / Monat wurde ein Zweistufenerweiterungsmodell gewählt.

Das Konzept, siehe hierzu auch Abbildung 4-50, enthält in der ersten Ausbaustufe eine Nietanlage, die über eine Umsetzeinheit (180°) beidseitig dem Bauteil (Seitenleitwerk A380) zugeführt werden kann.

Diese Vorgehensweise reduziert den Investitionsbedarf zum Produktionsanlauf und ermöglicht durch entsprechende Optimierungsansätze im Praxisbetrieb eine Verzögerung bzw. Verschiebung der Erweiterungsinvestition. Des Weiteren entsteht mit der Beschaffung der zweiten Nietanlage / Positionierer ein angepasstes Kapazitätsangebot mit zusätzlicher Notausfallstrategie durch die Integration von Reparaturplätzen für die Positionierer A+B (siehe Abbildung 4-51).

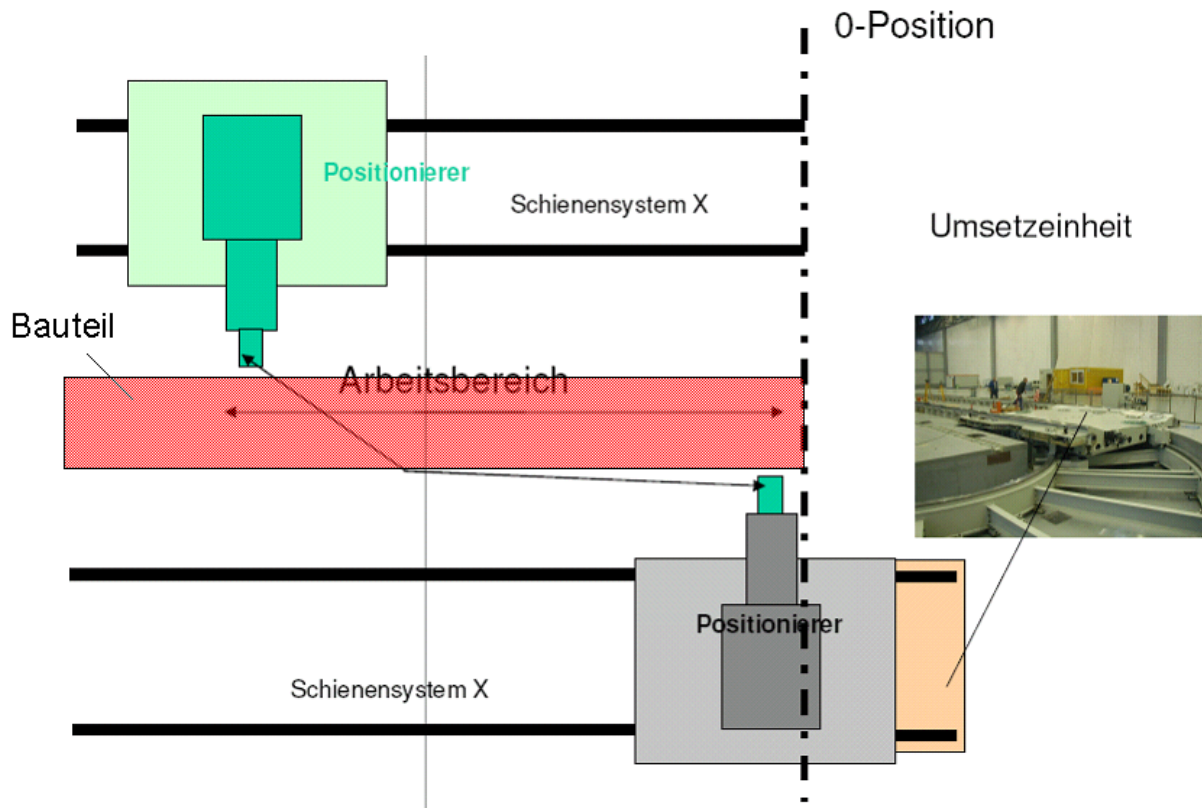


Abbildung 4-50: Prinzip der Nietanlage /6/

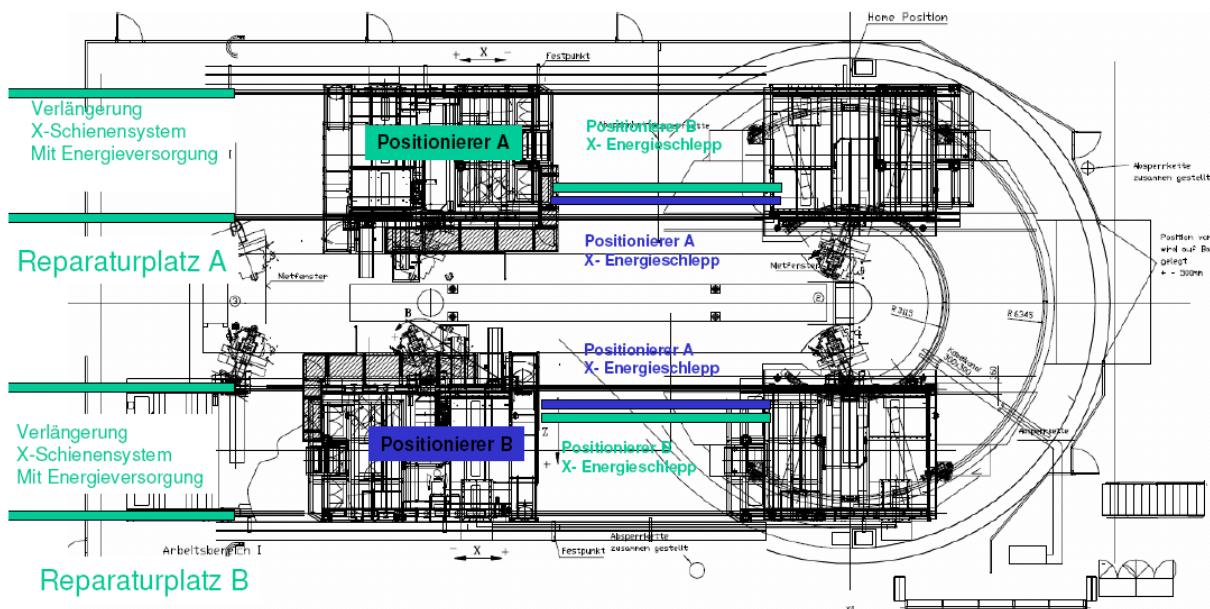


Abbildung 4-51: Integration von Reparaturplätzen /6/

Dies bedeutet, dass das Bauteil bei einseitigem Anlagenausfall über den Umsetzer zwar verzögert, aber doch abschließend bearbeitet werden kann.

Die für den Nietprozess erforderlichen Funktionen übernimmt entsprechend der Revolver-Endeffektor mit seinen Basisfunktionen (Abbildung 4-52) und den in Abbildung 4-53 dargestellten Optionen.

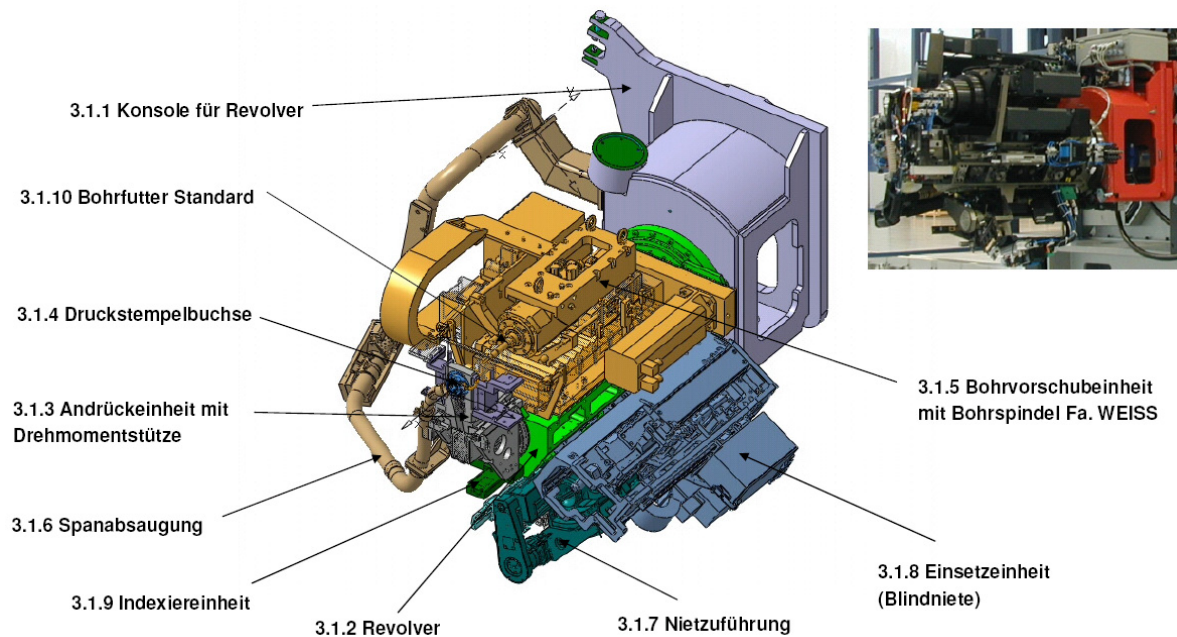


Abbildung 4-52: Basisfunktionen des Revolver-Endeffektors /6/

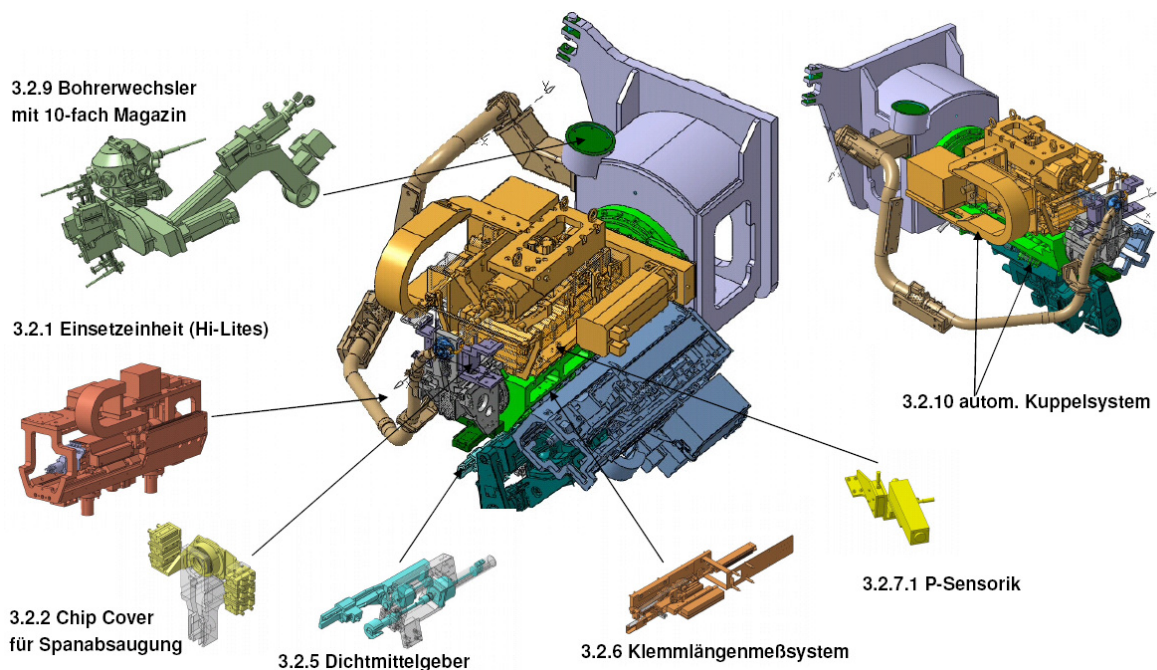


Abbildung 4-53: Optionen des Revolver-Endeffektors /6/

Die Abarbeitung der einzelnen Prozessschritte (Tabelle 4-6) erfolgt erst nach der Einjustierung der Anlage und des NC-Programms auf die reale Lage des Bauteils. Dies geschieht durch Referenzniete, die in der Strukturmontagestation manuell gesetzt wurden.

Schritt	Beschreibung	Dauer [s]	Nur Bohren		Bohren mit Blindniet	
			ohne	mit Klemmdicke	ohne	mit Klemmdicke
1	Initialschritt					
2	Revolver in Grundstellung	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
3	Klemmen des Bauteils	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
4	Pre Start - Bohreinheit auf FAL	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
5	Bohren (nur Schneideneingriff)	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
6	Drehen zur Klemmdickenpos.	2,00		2,00		2,00
7	Klemmdicke messen	2,00		2,00		2,00
8	Auswahl des Zyklus	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
20	Drehen zum Bolzen	4,70				
21	Bolzeneinsetzen	3,00				
30	Drehen zum Blindniet	2,70			2,70	2,70
31	Blindniet einsetzen	3,00			3,00	3,00
41	Zyklus abschließen	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
42	Zyklus Ende	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
43	Grundstellung anfahren		0,02	2,00		
	Nebenzeit für Positionierung	1,0		1,0	1,0	1,0
	Zykluszeit (Niet im Einsetzer)		5,12	10,10	9,80	13,80

Tabelle 4-6: Darstellung der Prozessschritte /6/

Durch den Einsatz der Revolvertechnologie, d.h. alle Funktionen des Endeffektors arbeiten zur Mittellinie der Bohrung, entstehen sehr kurze Rüst- und Positionierzeiten, unterstützt wird dieser Prozess durch das ausgewählte Nietauswahlssystem. Das in Abbildung 4-54 gezeigte Nietauswahlssystem, bestehend aus einer Beladestation und den einzelnen Nietkassetten (Abbildung 4-55), füllt die Schlauchpakete in der Nietkassette mit den entsprechenden Verbindungselementen.

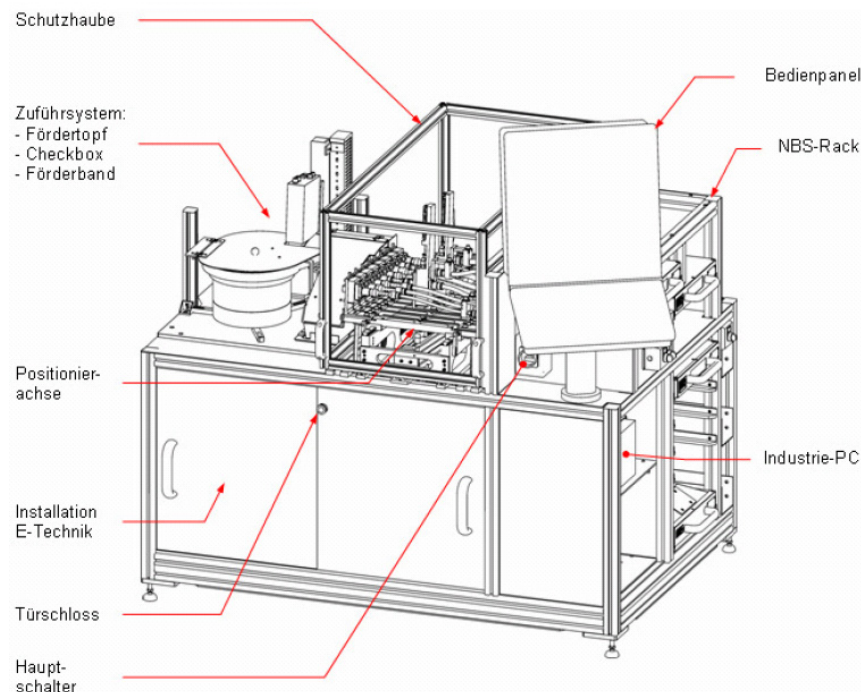


Abbildung 4-54: Nietbeladestation /6/

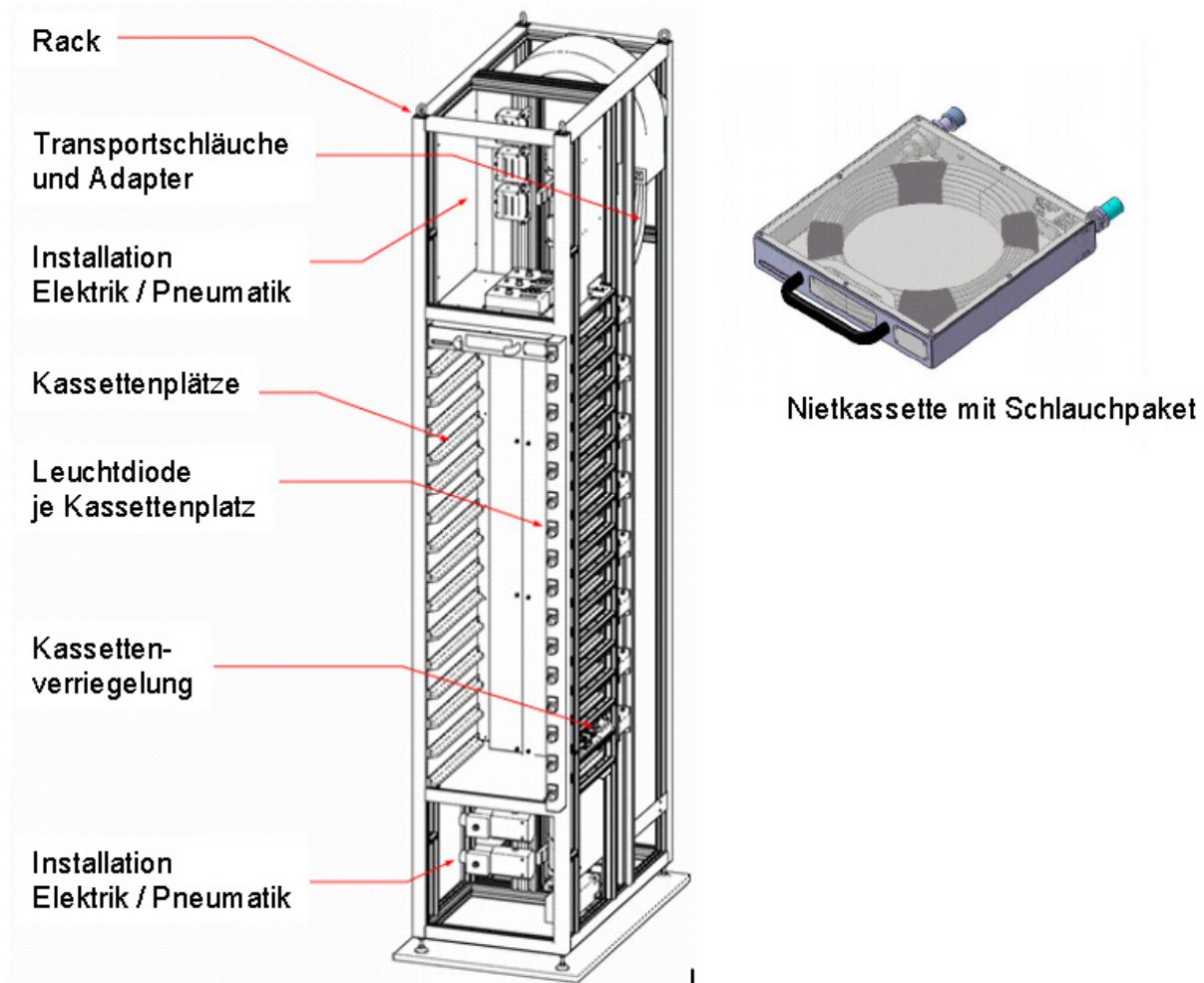


Abbildung 4-55: Nietauswahlsystem und Nietkassette /6/

Diese werden dann dem eigentlichen Nietauswahlsystem über das Racksystem zugeführt. Mittels NC-Programm wird dann die jeweilige Kassette angesteuert und der Niet dem Endeffektor zur Verfügung gestellt.

Die beschriebene Anlage arbeitet vollautomatisch und setzt ca. 10.000 Verbindungselemente pro Seitenleitwerk mit einer technischen Verfügbarkeit von 98%.

Neben dem Automatisierungsgrad und der Verfügbarkeit der Anlage sind in der CFK-Montage insbesondere die Verfahrensparameter und Toleranzen der Montageverbindung und damit der Automatisierungssysteme von besonderer Bedeutung.

Im Nachfolgenden sollen die erforderlichen Verfahrensanforderungen kurz erläutert werden:

- Herstellung der Bohrung
 - Rechtwinkligkeit zur Oberfläche $90^\circ \pm 1^\circ$
 - Bohrungstoleranz H8-H11
 - zulässige Delaminationen beim Bohreraustritt (Abbildung 4-56)

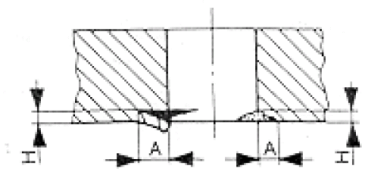
Hole Nominal diameter (mm)	Defect dimensions				Remarks
	Fabrics		Tapes		
	H(mm)	A(mm)	H(mm)	A(mm)	
< 3,2	0,18	0,50	0,35	1,3	
3,6		0,65		2,0	
4,0		0,75		2,5	
4,8		0,75		2,5	
6,4		1,0		2,5	
8,0	0,18	1,0	0,35	3,0	
9,5		1,0		3,0	
> 11,0		1,0		4,0	

Abbildung 4-56: zulässige Delaminationen beim Bohreraustritt /6/

- Herstellung der Senkung
 - Bei einer 130°-Senkung ist die Bohrungstoleranz $\pm 0,5^\circ$.
 - Die Lagetoleranz muss Abbildung 4-57 entsprechen.
 - Konzentrität Senkung/Bohrung $\pm 0,05$ mm
 - Koaxialität Senkung/Bohrung $\pm 1^\circ$

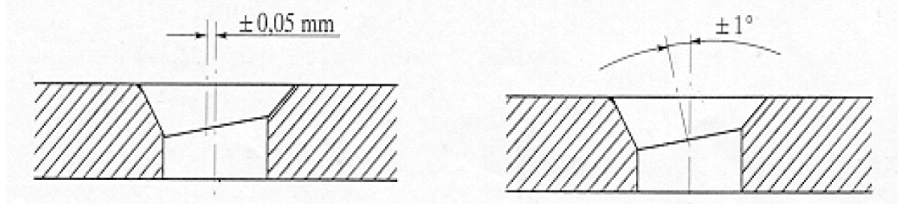


Abbildung 4-57: Lagetoleranz /6/

- Die Toleranz der Senktiefe beträgt $\pm 0,02$ mm, die Wiederholgenauigkeit $\pm 0,015$ mm
- Herstellung der Anfasung
 - Für die Setzkopfseite des Blindbolzens gelten folgende Toleranzen.

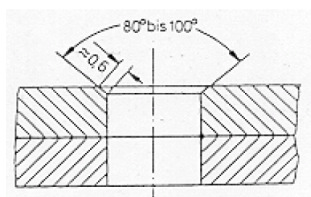


Abbildung 4-58: Anfasungstoleranzen auf der Setzkopfseite /6/

- Toleranzen für die Senkkopfseite sind Abbildung 4-59 zu entnehmen.

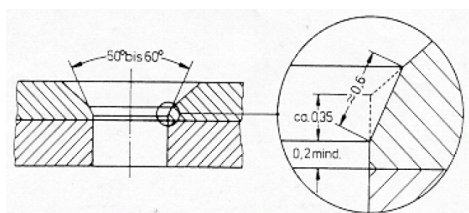


Abbildung 4-59: Anfasungstoleranzen auf der Senkkopfseite /6/

- Herstellung der Verbindung
 - Eine Beschädigung der Blindniete (Setzkopf, Schaft) bzw. der Struktur (Ausbeulen, Verbiegen) ist nicht zulässig.
 - Zwischen Bauteil und Setzkopf darf der Spalt nicht größer als 0,1 mm sein (Abbildung 4-60). Dieser Spalt ist bei 10% der Niete zulässig, jedoch dürfen keine zwei Niete mit gleichem Fehler nebeneinander liegen.

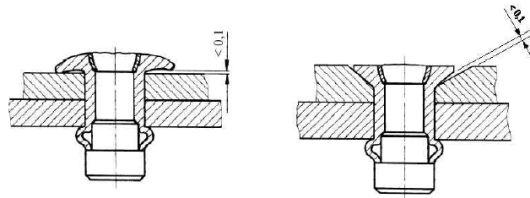


Abbildung 4-60: Spalt am Setzkopf /6/

- Des weiteren darf die Wölbung zwischen den Nietmitteln eine Spaltweite von 0,3 mm nicht überschreiten, am Nietschaft max. 0,05 mm (Abbildung 4-61).

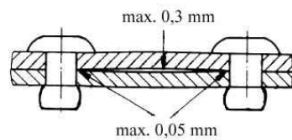


Abbildung 4-61: zulässige Wölbung /6/

Mit Abschluss aller automatisch setzbaren Nietverbindungen wird die Transferpalette mittels Shuttle in die Ausrüststation transportiert.

4.3.1.4 Ausrüststation

Die Ausrüststation, ausgestattet mit zwei Scherenhubplattformen, links und rechts vom Bauteil, übernimmt die Montage der Verkleidungs- und Anbauteile.

Aufgrund der Teiledimensionen können mit den eingesetzten Hubbühnen (Abbildung 4-62) alle Bauteilbereiche schnell und flexibel erreicht werden.

Nach dem Ausrüsten des Seitenleitwerks erfolgt das Aufrichten des Bauteils und das Einführen in Flugzeuglage in die Endmontage und Teststation.



Montagerahmen
A380 Seitenleitwerk
Scherenhubbühne
Transferpalette

Abbildung 4-62: Ausrüststation mit seitlichen Scherenhubbühnen (Quelle: Airbus)

4.3.1.5 Endmontage und Teststation

Nach dem Aufsetzen und Klemmen des SLW auf die Montagetraverse (Abbildung 4-63) wird das Seitenleitwerk über eine Laservermessung der Ruderachse exakt zur Rumpfmontageposition ausgerichtet.

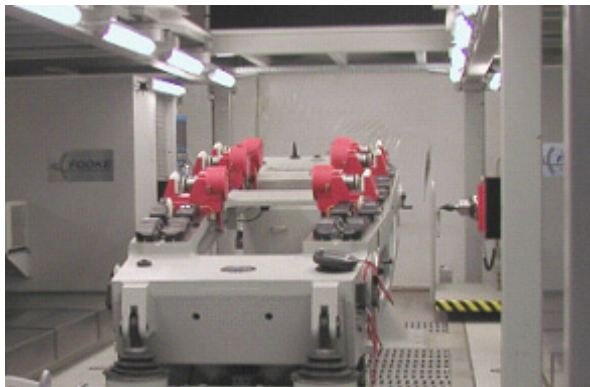


Abbildung 4-63: Montagetraverse (Quelle: Airbus)



Abbildung 4-64: Bearbeitungsmaschine zum Setzen von Verbindungsbohrungen (Quelle: Airbus)

Danach werden mittels zweier Bearbeitungsmaschinen (Abbildung 4-64) die Referenz- und Verbindungsbohrungen zum Rumpf hergestellt.

Diesem Arbeitsgang folgt die Montage der Aktuatoren und Ruder sowie der Elektrik- und Hydrauliktest.

Die integrierte Strukturmontage des A380-Seitenleitwerks zeigt, dass eine Unterscheidung oder auch Ausrichtung der Montageprozesse nach Vormontage, Strukturmontage und Ausrüstungsmontage produktionstechnisch nicht mehr sinnvoll ist.

Damit verbleiben für die Ausrüstungsmontage nur die Arbeitsinhalte, die eine abgeschlossene Strukturmontage (Montageflächen) benötigen, in der die Zugänglichkeit der Montage, die Wiederholbarkeit der Prozesse und der Arbeitsinhalt pro Arbeitsgang gewährleistet sind. Dies soll im nachfolgenden Kapitel näher betrachtet werden.

4.4 Automatisierung der Funktion Ausrüstungsmontage

Die Ausrüstungsmontage in der CFK-Fertigung unterscheidet sich nicht grundsätzlich von Montagen im metallischen Bereich.

Für die Wahl des Montageprinzips sind folgende Parameter bestimmend:

- Montagevolumen pro Komponente,
- Stückzahl pro Zeiteinheit,
- Transparenz der Arbeitsinhalte,
- Platz- und Investitionsbedarf.

Unter Berücksichtigung oben genannter Parameter und der weiteren Industrialisierung und Automatisierung von CFK-Produkten, dies gilt insbesondere für die Flugzeugmontage, entstanden in den vergangenen Jahren Produktionskadenzen, die neue Montageprinzipien erfordern.

Grundlage dieser neuen Montagesysteme sind in der Regel Ansätze aus dem Produktionssystem „Lean Manufacturing“⁴³.

Der Aufbau und die Funktion dieser Systeme folgt dabei einfachen Regeln (Abbildung 4-65: Aufbau und Funktion von Lean-Manufacturing-Systemen /2/) wie z.B.:

- Stabilität,
- Flussorientierung,
- synchrone Produktion,
- Ziehsystem (Pull-System),
- nivellierte Produktion.

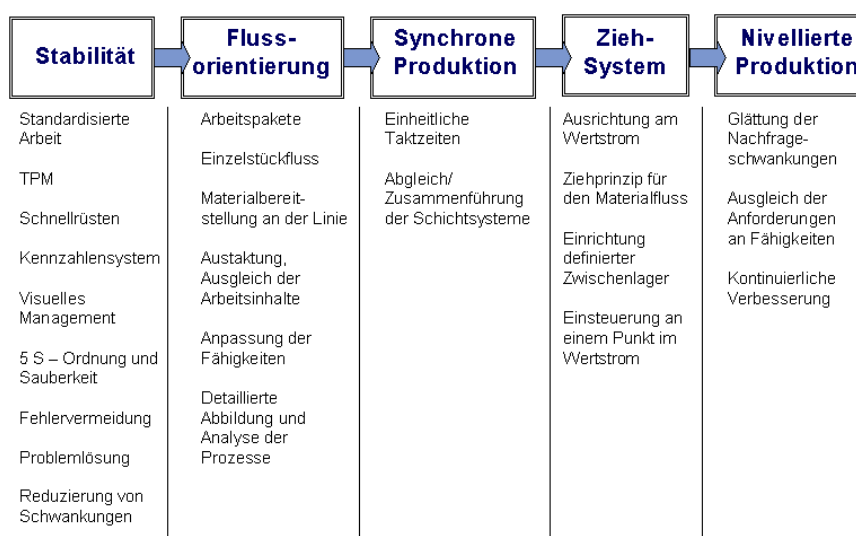


Abbildung 4-65: Aufbau und Funktion von Lean-Manufacturing-Systemen /2/

⁴³ Lean Manufacturing setzt sich zum Ziel, jegliche Verschwendung innerhalb eines Produktionsprozesses zu eliminieren.

Der dabei eingesetzte Automatisierungsgrad bezieht sich fast ausschließlich auf das Handling- und Transportsystem.

Montageroboter werden aufgrund der Stückzahl, z.B. 50 Komponenten/Monat, der Komplexität der Montage und der daraus resultierenden Anlagenauslastung kaum bzw. nicht eingesetzt.

Im Flugzeugbau und damit in der CFK-Ausrüstungsmontage haben sich insbesondere drei Montagesysteme durchgesetzt.

4.4.1 Taktfertigung

Bei der Taktfertigung wird das Bauteil, in diesem Fall die Torsionsbox eines A320-Seitenleitwerks, nach der Strukturmontage mittels Kran auf die Montagestation abgelegt (Abbildung 4-66).



Abbildung 4-66: Taktfertigung in der Ausrüstungsmontage der A320-Seitenleitwerke (Quelle: Airbus)

Dabei gelten folgende Regeln und Randbedingungen:

Stabilität

Bei den auszuführenden Arbeiten handelt es sich um standardisierte Abläufe in der Elektrik- und Hydraulikmontage.

Zur Fehlervermeidung wird ein Poka-Yoke⁴⁴- und visuelles Managementsystem eingesetzt (siehe auch Abbildung 4-67).

⁴⁴ Der japanische Ausdruck Poka Yoke bezeichnet ein aus mehreren Elementen bestehendes Prinzip, welches technische Vorkehrungen bzw. Einrichtungen zur sofortigen Fehlerrückmeldung und -vermeidung umfasst.



Abbildung 4-67: Poka-Yoke-System in der SLW-Montage (Quelle: Airbus)

Flussorientierung

Der Materialfluss folgt dem Gesamtsystem. Die Arbeitspakete entsprechen dem Taktsystem, die benötigten Montagematerialien werden vorkommissioniert angeliefert.

Synchrone Produktion

Die Anzahl der Montageplätze ist auf die Taktfrequenz der Montagelinie abgestimmt. Alle Montagetätigkeiten werden an einem Montageplatz durchgeführt und sind schichtübergreifend organisiert.

Ziehsystem (Pull-System)

Der Kundenabnahmetermin im Montageturm bestimmt den Montagezyklus und damit die Reihenfolge in der Montagestrasse. Das Taktprinzip basiert somit auf einem Montagevolumen von etwa 150 h/Taktstation. Die Transportzeiten sind klein ($<0,5$ h) und der Montageaufwand ist gering.

4.4.2 Flow-Line⁴⁵

Beim Flow-Line-Prinzip ist das Montagevolumen wesentlich höher (etwa um den Faktor 10) als bei der Taktmontage. Der Materialfluss folgt gemäß Abbildung 4-68 einer Richtung und ist in einzelne Montageschritte / Stationen aufgeteilt.

⁴⁵ „Flow-Line“ bezeichnet eine bestimmte Art der Fließfertigung. Im Gegensatz zur „Moving Line“, bei der sich das Bauteil kontinuierlich bewegt, wird es in der Flow-Line nur in bestimmten, fest definierten Abständen weiter bewegt.



Abbildung 4-68: Flow-Line in der Airbus Flügelaustrüstung (Quelle: Airbus)

Dabei gelten folgende Regeln:

Stabilität

Der Arbeitsumfang ist auf eine Vielzahl von Montagepunkten bzw. -plätzen verteilt. Alle Arbeitsumfänge pro Platz sind standardisiert.

Flussorientierung

Die Flussorientierung folgt nachfolgendem Schema (Abbildung 4-69).

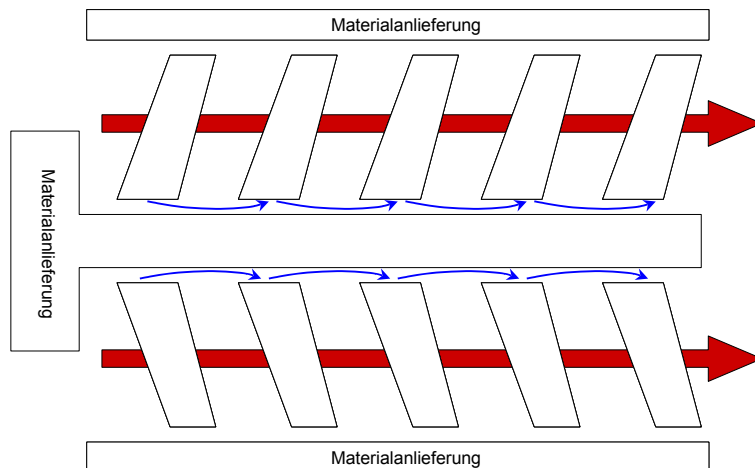


Abbildung 4-69: Flussorientierung in einer Flow-Line-Produktion

Die Materialanlieferung wird jedem einzelnen Takt zugeordnet und über die Anlieferzonen mittig und seitlich der Linie zugeführt.

Synchrone Produktion

Alle Takte sind inhaltlich abgeglichen und synchronisiert. Der Takt wird gleichzeitig für alle Stationen durchgeführt, damit entsteht ein Zwangsablauf.

Ziehsystem (Pull-System)

Der Abliefertermin bestimmt die Montagesequenz und den Wertestrom des Bauteils.

Das Flow-Line-Prinzip ermöglicht eine klare übersichtliche Montagestruktur. Durch die Zwangstaktung werden Abweichungen / Störungen sofort erkennbar, allerdings wird der Montageprozess dabei unterbrochen. Die Synchronisation aller Takte, die auch über die Anzahl an Mitarbeitern gesteuert werden kann, ist unabdingbare Voraussetzung für die Realisierung dieser Montagestruktur.

4.4.3 Moving-Line⁴⁶

Die Moving-Line ist eine Weiterentwicklung der Flow-Line. Durch die kontinuierliche Fließgeschwindigkeit der Montagestationen wird der Montageprozess nicht unterbrochen. Das bei Airbus in Hamburg entwickelte Konzept wurde erstmals in der A320-Rumpfausrüstung angewendet. Der Einsatz in der CFK-Ausrüstungsmontage z.B. beim CFK-Rumpf ist jederzeit denkbar bzw. umsetzbar.

Abbildung 4-70 zeigt das Prinzip der Moving-Line in Hamburg.

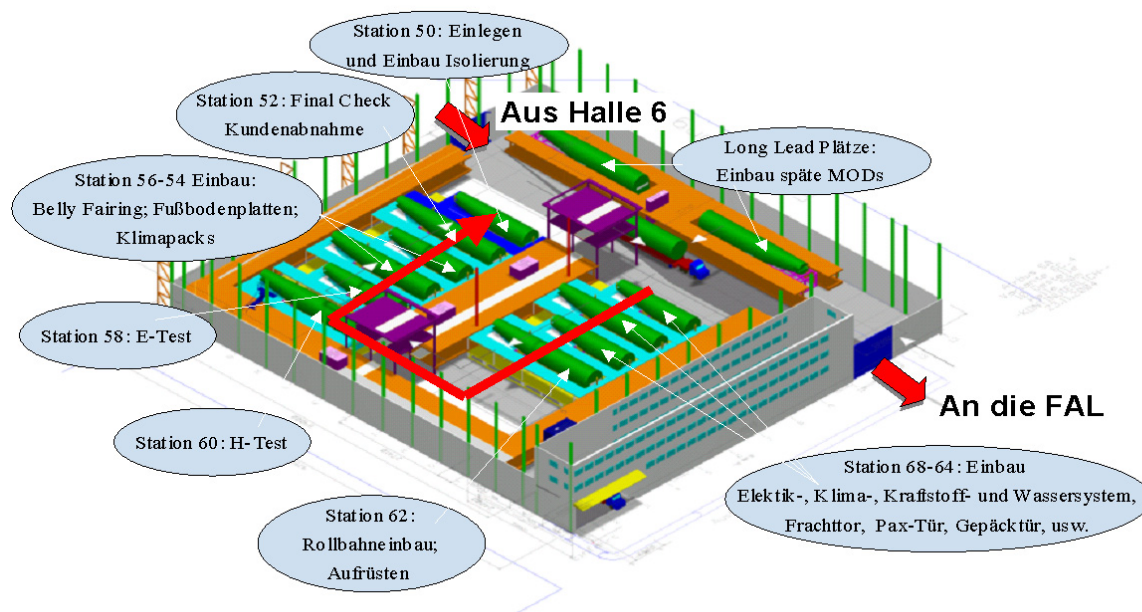


Abbildung 4-70: Prinzipdarstellung der Moving-Line in der A320-Ausrüstungsmontage in Hamburg (Quelle: Airbus)

Dabei werden folgende Parameter / Ziele umgesetzt:

- Die Moving-Line besteht aus 9 Stationen + 1 Kundenabnahmestation.
- Die Fertigungszeit einer Station beträgt ~9,3 Stunden (bei 30 A/C pro M.).

⁴⁶ Eine „Moving-Line“ ist eine bestimmte Variante der Fließfertigung, bei der sich das Bauteil mit einer konstanten Geschwindigkeit während des Fertigungsprozesses ohne Zwischenstops vorwärts bewegt.

- Die kontinuierliche Fließgeschwindigkeit beträgt 1 m/Stunde.
- Die Durchlaufzeit eines Rumpfhecks in der Ausrüstungsmontage wird von 9 auf 5 Tage reduziert.
- Enge Kunden-Lieferanten-Beziehung: Jede Station ist der Lieferant für die nachfolgende Station.
- Vorgangsbezogene Kommissionierung und Logistiksteuerung.

Diesen Ansätzen entsprechend lassen sich die Regeln wie folgt beschreiben:

Stabilität

Das Montagevolumen wird in standardisierte Arbeitspakete aufgeteilt und auf die benötigte Anzahl der Arbeitsstationen verteilt. Kennzahlen und visuelle Systeme sichern den Prozess ab.

Flussorientierung

Der Materialfluss erfolgt idealerweise in U-Form mit einer kontinuierlichen Vorschubgeschwindigkeit.

Das Montagematerial wird dem jeweiligen Montageplatz zugeordnet. Die Entnahme erfolgt von oben nach unten. Allgemeingültige Materialien wie z.B. Verbindungselemente / Schrauben etc. werden im Freestocklager bereitgestellt.

Synchrone Produktion

Durch die kontinuierliche Transportgeschwindigkeit müssen die Taktinhalte abgestimmt sein. Daher ist darauf zu achten, dass keine gegenseitige Behinderung der Mitarbeiter stattfindet.

Ziehsystem (Pull-System)

Die Ausrichtung des Wertestroms folgt dem Kundentermin.

Das Moving-Line-Konzept ist die konsequente Anwendung der Lean-Manufacturing-Ansätze, welche im nächsten Kapitel weiter detailliert und beschrieben werden sollen.

5 Lean Manufacturing Ansätze in der CFK-Fertigung

Ein weiterer wichtiger Baustein in der Prozessstabilisierung ist das Produktionssystem „Lean Manufacturing“.

Basierend auf der Erkenntnis, dass gemäß Abbildung 5-1 der wertschöpfende Anteil in der Produktion auf etwa 5% der Gesamtdurchlaufzeit begrenzt ist und ein gewisser Prozentsatz (ca. 20%) an Verschwendung nicht vermeidbar ist, beschäftigt sich die Produktionsphilosophie „Lean Manufacturing“ oder auch „Schlanke Fertigung“ ausschließlich mit den 75% an vermeidbarer Verschwendung im Prozessdurchlauf.

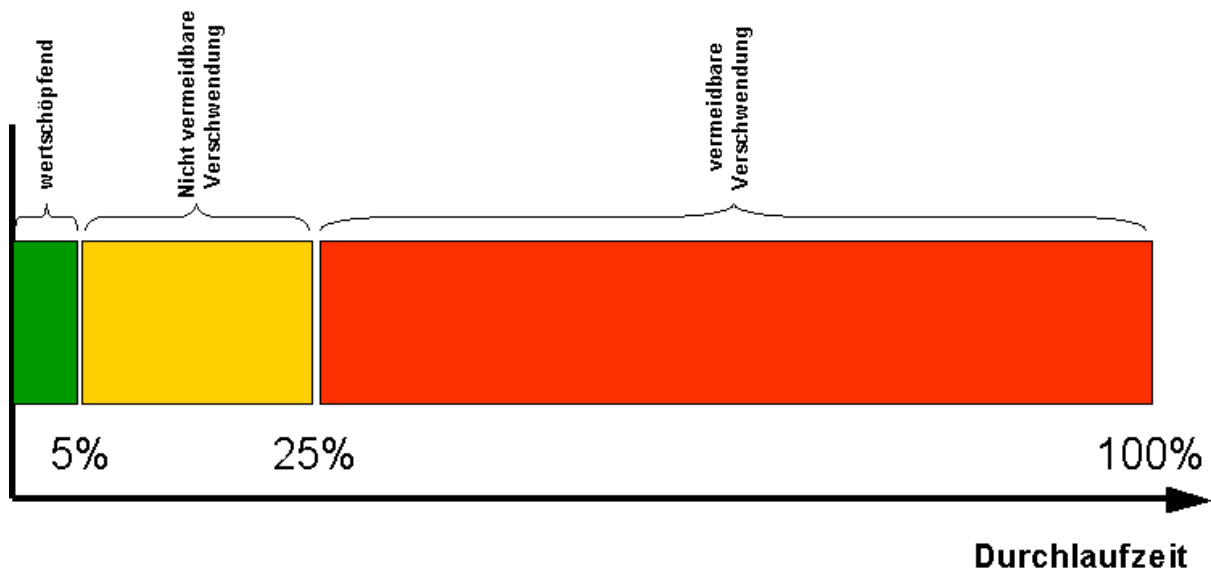


Abbildung 5-1: Anteil an Verschwendung in einem Produktionsprozess /2/

Die Begriffsdefinition folgt dabei nachfolgender Abbildung 5-2 bzw. Erklärung.

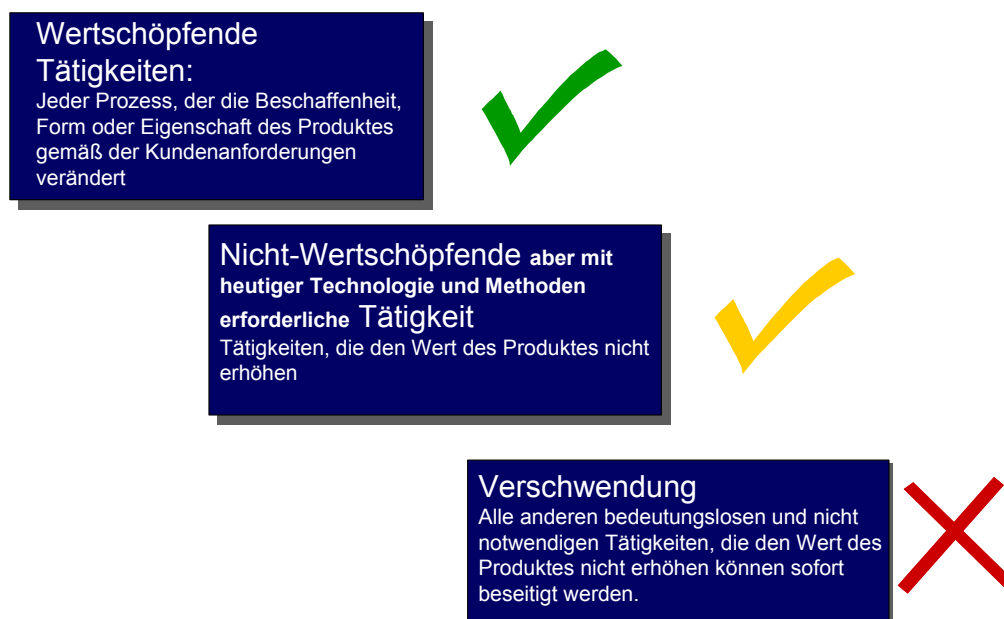


Abbildung 5-2: Begriffsdefinition /2/

Ziel ist es somit nicht, den Bereich der Wertschöpfung (ca. 5%), wie in Kapitel 2, 3 und 4 beschrieben, durch

- neue Maschinen und Anlagen,
- zusätzliche Mitarbeiter,
- längere Betriebszeiten,
- kürzere Vorgabezeiten,
- höhere Automation

zu optimieren, sondern die bestehenden nicht wertschöpfenden Prozesse (ca. 95%) zu analysieren und zu verändern.

Zur Anwendung kommt dabei eine Methode, die entsprechend auf die Kernelemente

- Methoden und Werkzeuge,
- Verhaltensweisen und
- Kennzahlen

aufgebaut ist.

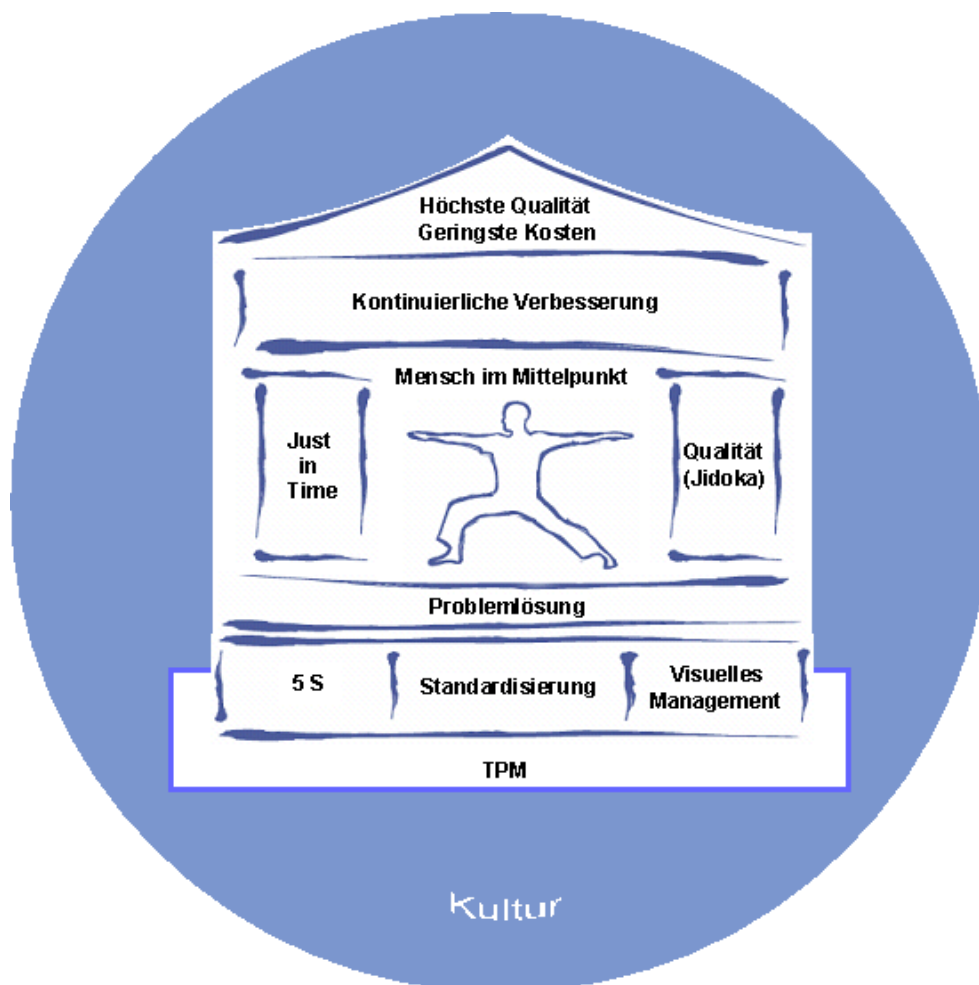


Abbildung 5-3: Lean-Manufacturing-Ansätze /2/

5.1 Schlüsselmerkmale einer schlanken Fertigung

Im Nachfolgenden sollen die einzelnen Lean-Faktoren erläutert und hinsichtlich ihrer Stabilitätsoptimierung analysiert werden.

Im Vordergrund steht dabei nicht, die in der Lean-Methode primär unterstellte Verschwendungsreduzierung, sondern die Auswirkung auf die Prozessstabilität.

5.1.1 5S – Ordnung und Sauberkeit

5S ist ein systematischer Ansatz zur Arbeitsplatzorganisation, der das Verantwortungsgefühl und die Selbstdisziplin stärkt, um verbesserte Abläufe nachhaltig anzuwenden und weiter zu entwickeln. /2/

Das Prinzip konzentriert sich auf die in Abbildung 5-4 dargestellten Ansätze.

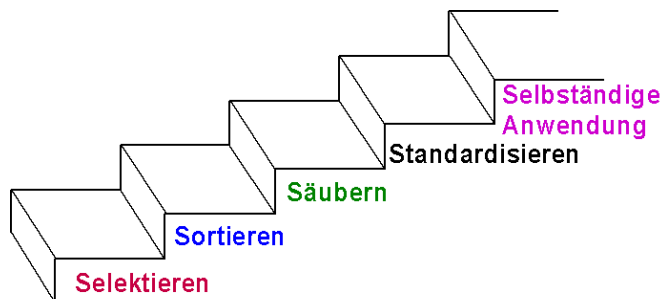


Abbildung 5-4: Ansätze beim 5S-Prinzip /2/

Selektieren

Der Begriff „Selektieren“ zielt darauf ab, das unmittelbare Arbeitsumfeld neu zu gestalten. Es beginnt mit

- einer Grundreinigung,
- dem Entfernen aller nicht benötigten Gegenstände und
- dem Aussortieren defekter Werkzeuge.

Anschließend werden die benötigten Werkzeuge und Maschinen nach Abbildung 5-5 entsprechend ihrer Gebrauchshäufigkeit am Arbeitsplatz neu sortiert.

Kategorie	Beschreibung	Aktion
HOCH	stündlich	am Arbeitsplatz behalten
MITTEL	täglich/ wöchentlich	ins Lager der Abteilung
GERING	viertel-/ halbjährlich	Außerhalb des Bereichs lagern oder aussortieren

Abbildung 5-5: Einordnen von Gegenständen /2/

Sortieren

Nach dem Selektieren der Werkzeuge erfolgt das Sortieren der am Arbeitsplatz verbliebenen Werkzeuge und Maschinen nach folgendem Schema /2/:

- Alle notwendigen Gegenstände werden sinnvoll angeordnet.
- Die Anordnung erfolgt nach Gebrauchshäufigkeit.
- Es existiert ein festgelegter Platz für jeden Gegenstand, der geordnet und mit Beschriftung versehen ist.
- Einrichtung von sicheren Lagerplätzen: schwere Gegenstände werden unten, leichte oben gelagert.

Säubern

Das Säubern im Arbeitsbereich unterstützt die Prozessstabilität durch

- leichter zu erkennende Fehler,
- eine übersichtlichere Arbeitsumgebung,
- eine Reduzierung von Arbeitsunfällen und
- Standardisierung.

Standardisierung

Die Standardisierung stellt sicher, dass die Prozessschritte beschrieben und immer exakt wiederholt werden.

Zusätzlich ist sie die Grundlage für Problemlösungen und Verbesserungsaktivitäten. Sie fördert die Verantwortlichkeit und das Verantwortungsgefühl.

Selbstständige Anwendung

Der fünfte Schritt beschäftigt sich mit der selbstständigen Anwendung der beschriebenen Verbesserungsschritte. Dabei sollte der Veränderungsprozess zur Gewohnheit werden und mittels eines Überprüfungsturnus regelmäßig kontrolliert werden.

Im Airbus-Werk Stade wird dieses Prinzip seit Jahren mit Erfolg angewendet. Die Überprüfung erfolgt dabei über alle Fachbereiche, d.h. die Meister aus den unterschiedlichen Bereichen auditieren sich gegenseitig, aber auch der Personalleiter, Wirtschaftsleiter oder der Werkleiter führen Audits durch und bringen somit unterschiedliche Schwerpunkte und Sichtweisen in den Prozess ein.

5.1.2 Standardisierung

Der Begriff „Standardisierung“ beinhaltet folgende Definition /2/:

„Standardisierte Arbeit basiert auf den Bewegungen des Menschen und zeigt effiziente und sichere Vorgehensweisen, die Verschwendung vermeiden und den korrekten Umgang mit Anlagen und Maschinen sichern.“

Dabei werden in der Regel die Module

- kontinuierliche Verbesserung,

- Standard-Arbeitsanweisungen und
- Taktungstafel (Work Balance Board)

eingesetzt.

5.1.2.1 Kontinuierliche Verbesserung

Die Voraussetzung für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess ist die Standardisierung der Arbeit. Dabei ist wichtig, dass die Arbeit

- trainierbar,
- wiederholbar,
- steuerbar,
- messbar,
- beobachtbar und
- verbesserbar

ist.

Mit diesen Voraussetzungen lässt sich nach Abbildung 5-6 folgendes kontinuierliches Stufenmodell entwickeln.

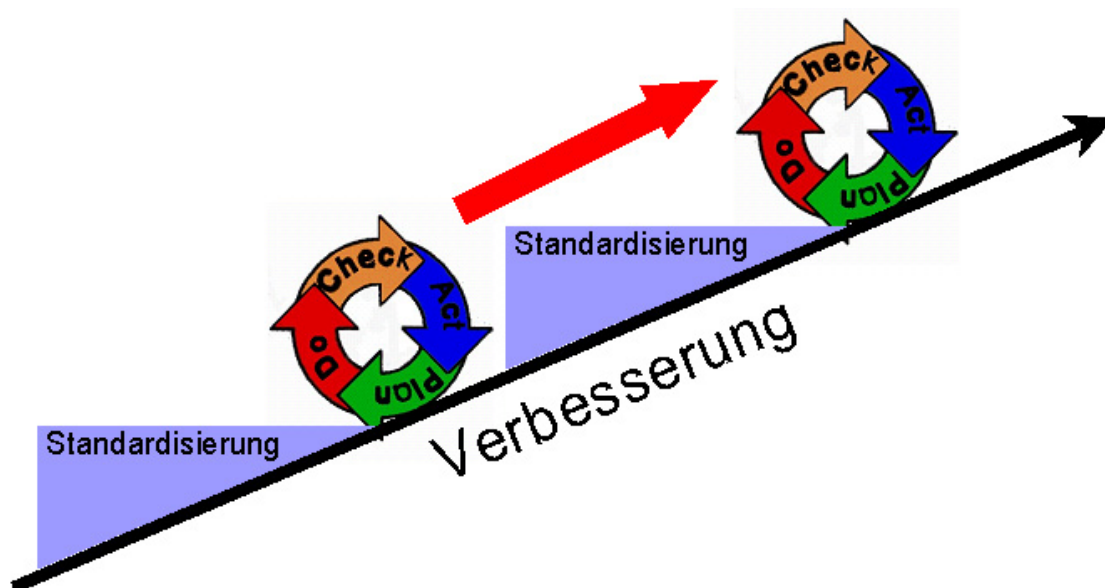


Abbildung 5-6: Stufenmodell zur kontinuierlichen Verbesserung /2/

5.1.2.2 Standard-Arbeitsanweisung

Die Standard-Arbeitsanweisung stellt die Einführung und Dokumentation der besten derzeitigen Arbeitsschrittfolge für einen Prozess dar, um die Sicherheit der Mitarbeiter, die Qualität der Produkte und die Effizienz sowie Stabilität des Prozesses sicherzustellen /2/.

Die Standard-Arbeitsanweisung ist ein Werkzeug, mit dem die Arbeitsgruppen ihre Arbeitsprozesse selbst steuern können. Es unterstützt die Anwendung der jeweils besten Vorge-

hensweise (Best Practice⁴⁷) und stellt sicher, dass alle Beteiligten ihre Fähigkeiten austauschen.

5.1.2.3 Taktungstafel (Work Balance Board)

Zur Reduzierung der Komplexität in der CFK-Montage als auch zur Stabilisierung des Prozesses werden entsprechend Kapitel 4.4.1 als auch Kapitel 4.4.2 fest vorgegebene Taktfrequenzen eingerichtet.

Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass alle Arbeitsinhalte verrichtet werden und der geplante Termin eingehalten wird.

Für die Analyse und Berechnung dieser Arbeitsinhalte eignet sich im Besonderen die Taktungstafel oder auch „Work Balance Board“ genannt.

Das Prinzip basiert darauf, den bestehenden Prozess in seine Bestandteile aufzulösen. Es wird somit nicht nur der eigentliche Montagevorgang, sondern es werden auch alle Sekundärinhalte analysiert.

Über Farbkennzeichnungen gemäß Abbildung 5-7 werden die Tätigkeiten gekennzeichnet.






-  1. **Wertschöpfende Tätigkeit:** Arbeit, welche die Form, die Eigenschaften, den Wert des Produktes ändert
-  2. **Notwendige nicht wertschöpfende Tätigkeit:** Arbeit, die selbst nicht wertschöpfend aber erforderlich ist, um die Form, die Eigenschaften, den Wert des Produktes zu verändern
-  3. **Nicht wertschöpfende Tätigkeit:** Arbeit, die nicht die Form, die Eigenschaften, den Wert des Produktes ändert
-  4. **Optionale Tätigkeit:** Arbeit, die nicht an jedem Produkt verrichtet wird und abhängig von der Spezifikation des Produktes ist
-  5. **Variable Tätigkeit:** Arbeit, die an jedem Produkt verrichtet wird aber in der Dauer von der Spezifikation des Produktes abhängig ist

Abbildung 5-7: Farbkennzeichnung auf der Taktungstafel /2/

Danach erfolgt eine Detailanalyse der Prozessschritte sowie eine farbliche Zuordnung der Tätigkeiten (Abbildung 5-8).

⁴⁷ Best practice bezeichnet bewährte und kostengünstige Verfahren, technische Systeme und Geschäftsprozesse, die Vorbild für andere Anwender sind.

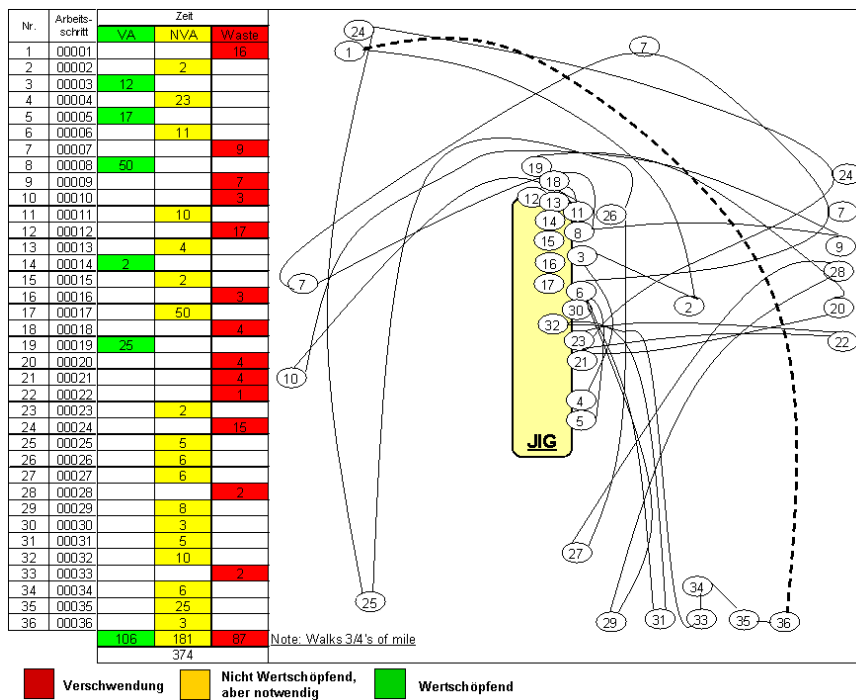


Abbildung 5-8: Detailanalyse der Prozessschritte /2/

Im Anschluss werden dann alle Einzelemente zur Prozesssäule (siehe Abbildung 5-9) zusammengefügt.

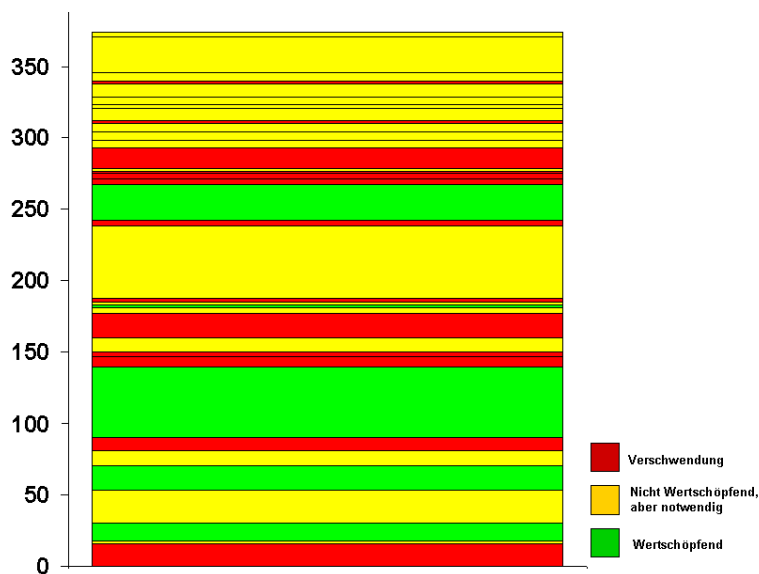


Abbildung 5-9: Prozesssäule /2/

Um den kompletten Montageprozess abzubilden, werden nun alle einzelnen Prozessschritte nach dem Prinzip in Abbildung 5-10 auf der Zeitachse dargestellt und über die Formel:

$$\text{Taktzeit} = \frac{\text{Verfügbare Produktionszeit}}{\text{Benötigte Stückzahl}}$$

berechnet.

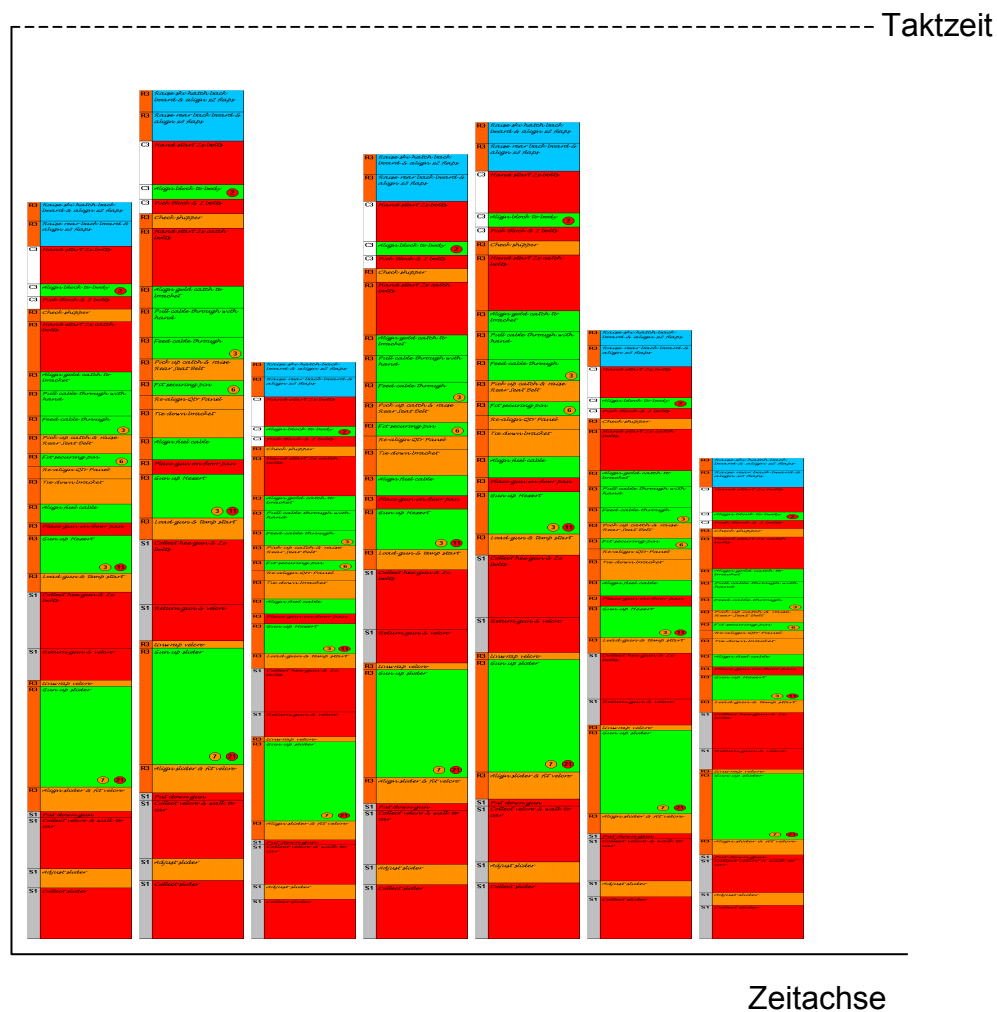


Abbildung 5-10: Beispiel für eine ungleichmäßige Taktteilung dargestellt über die Zeitachse /2/

Das in Abbildung 5-10 dargestellte Beispiel zeigt eine ungleichmäßige Taktauslastung. Der nächste Schritt ist somit, die Arbeitsinhalte neu zu gestalten bzw. den nicht wertschöpfenden Anteil im Prozess zu reduzieren.

Abschließend werden die neuen Arbeitsinhalte und Abläufe in der Standardarbeitsanweisung festgehalten (siehe Kapitel 5.1.2.2). Das Ergebnis ist ein synchronisierter stabiler Fertigungsprozess.

5.1.3 Visuelles Management

Das visuelle Management ist ein weiteres, sehr interessantes Modul zur Prozessstabilität. Durch den in der Regel sehr niedrigen Investitionsbedarf können schnelle und transparente Ansätze bzw. Optimierungen identifiziert werden.

Das System „Visuelles Management“ basiert dabei auf folgender Definition:

Implementierung von Systemen, die Wissen in die Arbeitsumgebung bringen und die Mitarbeiter dadurch befähigen, zwischen den Zuständen normal, unnormal und dringend zu unterscheiden. /2/

Mit dieser erreichten Transparenz kann man das Problem erkennen und haben somit das Potenzial, den Prozess zu steuern, was wiederum zu einer verbesserten Prozessstabilität führt.

Abbildung 5-11 zeigt das Prinzip, die Hierarchie über die 5S-Funktion, der visuellen Anzeige und der visuellen Steuerung.

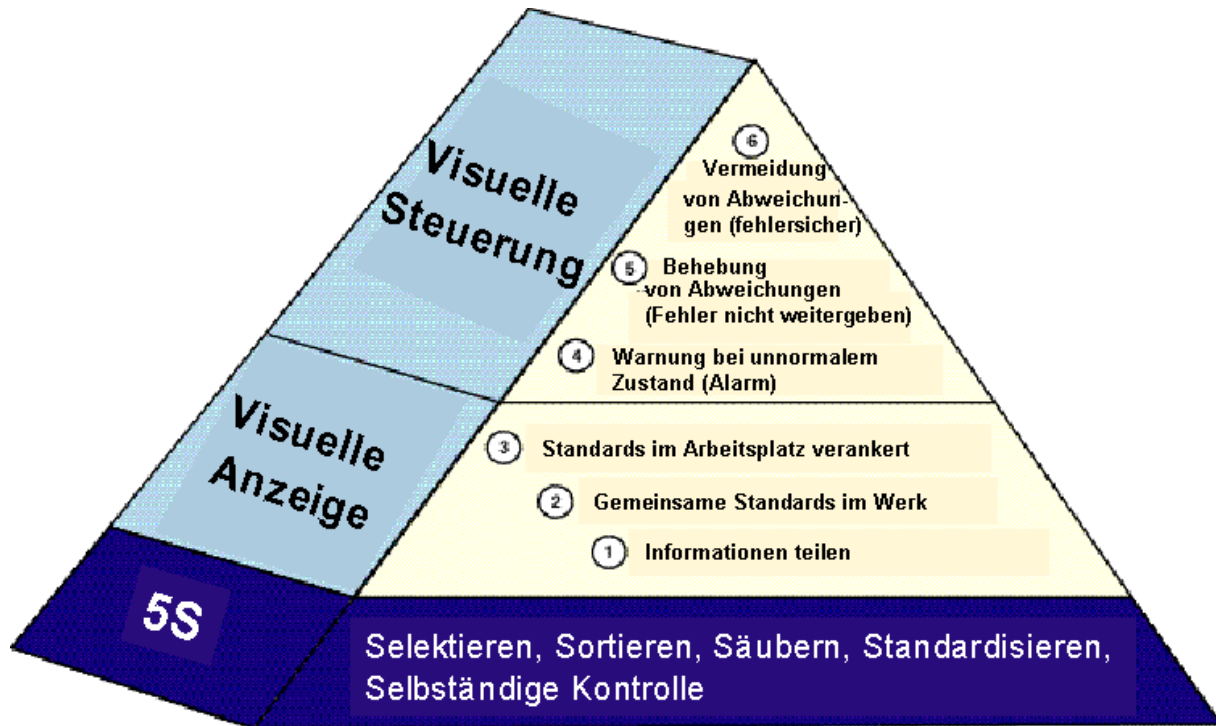


Abbildung 5-11: Hierarchie /2/

Zum Umsetzung des visuellen Managements bieten sich zwei ergänzende Vorgehensweisen an:

- Andon⁴⁸-Prinzip (Laternen-Prinzip),
- KPI⁴⁹-Prinzip (Key Performance Indicator).

5.1.3.1 Andon-Prinzip

Das Andon ist eine visuelle Steuerung, die es dem Maschinen- oder Systembediener erlaubt, Unterstützung anzufordern, wenn Abweichungen vom normalen Zustand auftreten. Das Werkzeug Andon hilft, Probleme, die bei der Arbeit auftreten, schnell zu erkennen und anzuzeigen.

Andon hilft somit, Probleme zu identifizieren, jedoch nicht zu lösen. /2/

⁴⁸ Andon ist eine Methode, eine selbsterklärende Symbolik zu erstellen, die zur Vermittlung von Funktionen und Abläufen an einer Maschine bzw. einem Prozess geeignet ist.

⁴⁹ Key Performance Indicator (KPI) bezeichnet in der Betriebswirtschaftslehre Kennzahlen, anhand derer der Fortschritt oder der Erfüllungsgrad hinsichtlich wichtiger Zielsetzungen oder kritischer Erfolgsfaktoren innerhalb einer Organisation gemessen und/oder ermittelt werden kann.

Die visuelle Steuerung funktioniert nach dem Ampel-Prinzip, entsprechend Abbildung 5-12 betätigt der Mitarbeiter manuell oder automatisch unterstützt die jeweilige Ampelfarbe, um den Anlagenstatus zu dokumentieren.

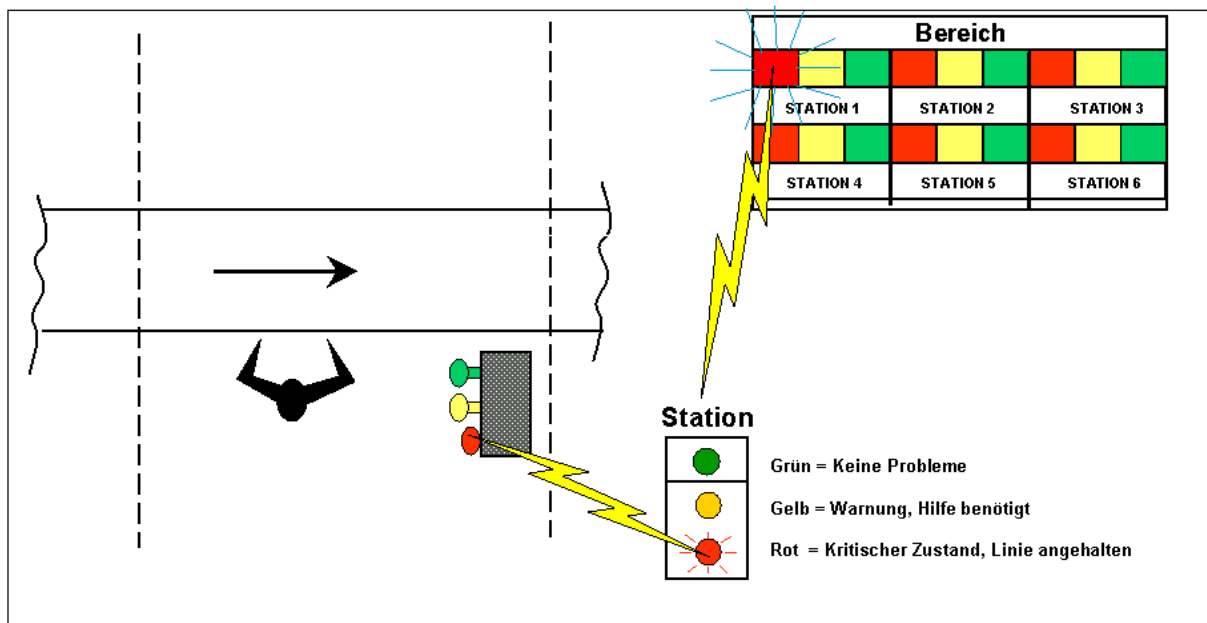


Abbildung 5-12: Anzeige Andon-Prinzip /2/

Entscheidend für den Erfolg des Andon-Systems ist die weitere Vorgehensweise bzw. die Reaktionszeit nach der Fehlermeldung.

Der Vorgesetzte muss dann schnell reagieren und entscheiden, welche Maßnahmen zu ergreifen sind. Er ist auch dafür verantwortlich, das Signal aufzuheben.

5.1.3.2 KPI-Prinzip

Das KPI-Prinzip beinhaltet die Hauptleistungskennzahlen eines Bereichs.

In der KPI-Cockpit-Tafel werden Kennzahlen definiert, die den Mitarbeitern und Führungskräften helfen, den derzeitigen Zustand der Produktion, Bereiche für Verbesserungen, Verantwortlichkeiten für Verbesserungsmaßnahmen und Termine für die Verbesserungen zu erkennen.

Dargestellt werden in der Regel die nachfolgend dargestellten Prozesse, dem SQPDC-Prinzip folgend:

- **S** = Sicherheit
Tägliche Darstellung der Arbeitsunfälle
- **Q** = Qualität
Tägliche Darstellung der Qualitätssituation
- **P** = Personen
Monatliche Darstellung der Krankenquote

- **D** = Lieferung / Delivery
Tägliche Darstellung der Liefersituation
- **C** = Kosten / Costs
Monatliche Darstellung der Kostensituation

Weiterhin erfolgt eine quartalsweise Verdichtung der Daten sowie eine detaillierte Verfolgung der Maßnahmen (siehe Abbildung 5-13).

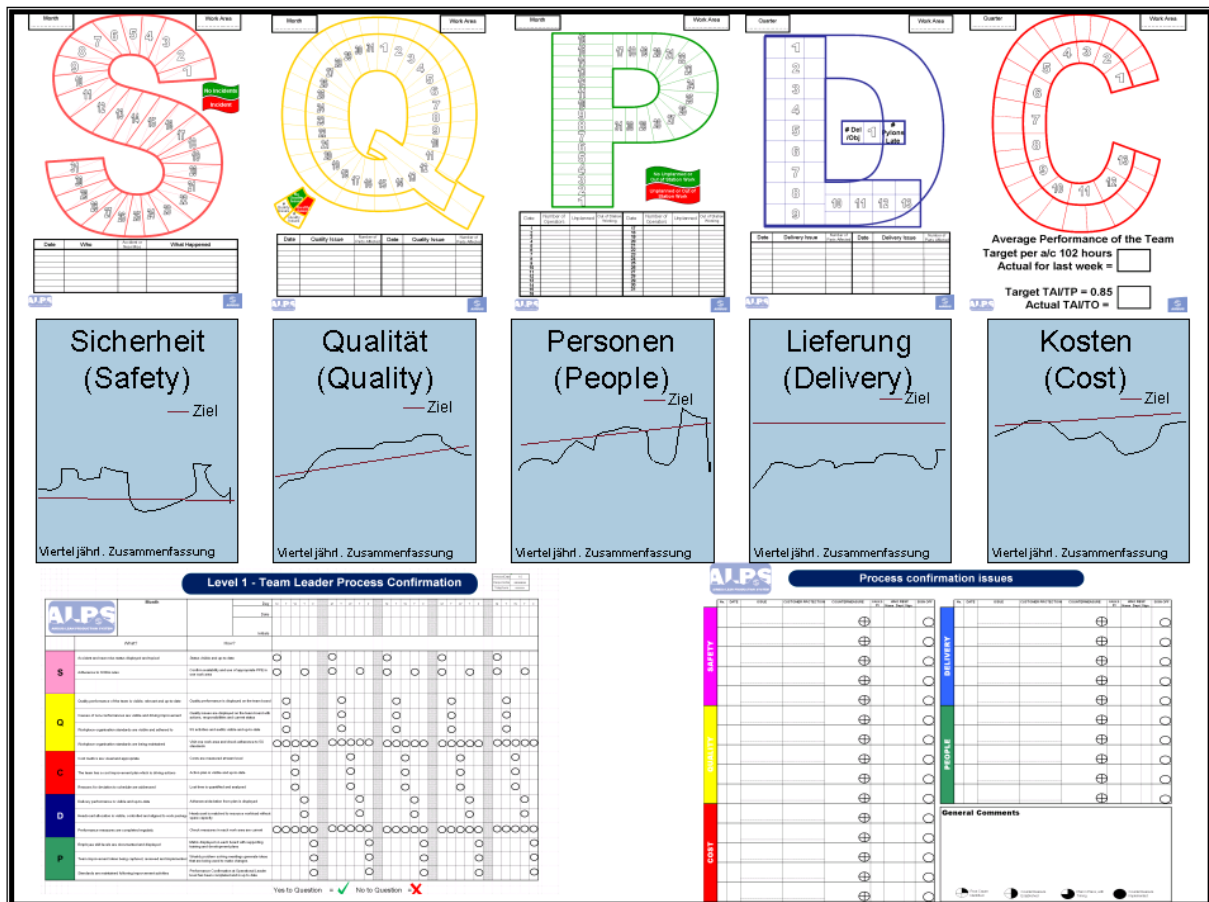


Abbildung 5-13: SQPDC-Darstellung auf dem Teamboard /2/

5.1.4 Total Productive Maintenance (TPM)

Beim TPM-Prozess handelt es sich um einen ganzheitlichen Ansatz, die Verfügbarkeit der Maschinen- und Anlagen zu erhöhen. Damit wird eine kurzfristige aber auch langfristige Prozessstabilität erreicht.

Das Prinzip basiert dabei auf folgenden Ansätzen /2/:

- Der Gruppenansatz bindet über funktionale Grenzen hinweg Mitarbeiter verschiedener Abteilungen mit ein.
- Das Team erhöht durch die Vermeidung von Verschwendung und von ungeplanten Stillstandszeiten die Produktivität.

- Es werden Instandhaltungstechniken eingesetzt, um Anlageneinsatz und -konstruktion zu verbessern.

Die Umsetzung erfolgt nach Abbildung 5-14 über das 5-Säulenprinzip.



Abbildung 5-14: 5-Säulenprinzip /2/

Individuelle Verbesserung der OEE (Overall Equipment Effectiveness)

Die OEE berechnet sich aus der Formel:

$$OEE = \text{Maschinenverfügbarkeit in \%} \times \text{Leistungsfaktor in \%} \times \text{Qualitätsrate in \%}$$

wobei sich die Maschinenverfügbarkeit aus den Ausfällen und Stillständen sowie dem Rüsten und den Anlageeinstellungen ergibt. Der Leistungsfaktor ist definiert durch Geschwindigkeitsverluste bzw. langsames Arbeiten. Die Qualitätsrate beinhaltet fehlerhafte Teile beim Anlauf bzw. im Prozess.

Ziel ist es, durch null Unfälle, Ausfälle und Fehler die OEE zu erhöhen.

Verantwortlich für diesen Prozess sind die Bediener, die Instandhaltung, das Engineering und das Management.

Autonome Instandhaltung

Die autonome Instandhaltung verfolgt das Ziel, zusätzliche Verantwortung für die Maschinenleistung auf die Bediener zu übertragen.

Dabei werden folgende Aktivitäten unterstellt /2/:

- Grundreinigung (5S),
- Identifizieren der Instandhaltungsaufgaben,
- Zielzustände definieren,
- Methode und Häufigkeit der Anwendung festlegen,
- Dokumentation und Visualisierung,
- Überprüfung/ Bestätigung.

Zur Umsetzung dieser Aktivitäten werden in der Regel Checklisten nach Abbildung 5-15 eingesetzt.

TPM-Checkliste									
Schicht:	Monat:								
Verantwortung:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ölen an Punkt 12	●				○				
Schmiernippel 3 verwenden	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Druckanzeige 1 prüfen	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Luftdruck 14 überprüfen	●	●	●	○	○	○	○	○	○

Abbildung 5-15: Checkliste für die autonome Instandhaltung /2/

Mit Einführung der autonomen Instandhaltung sollten sich die Verantwortlichkeiten entsprechend Abbildung 5-16 verändert haben.

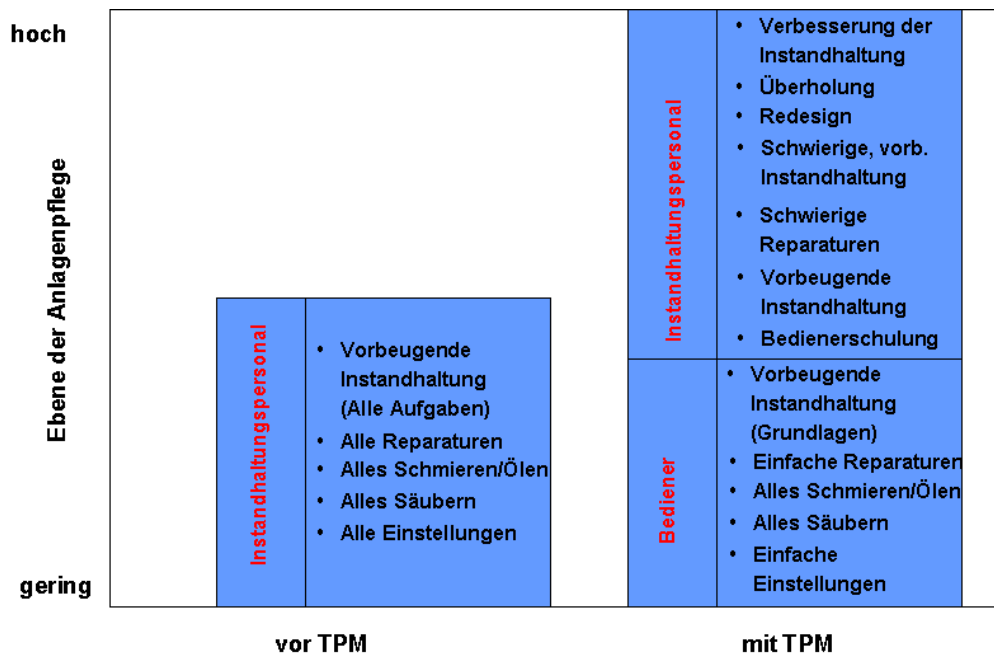


Abbildung 5-16: Verantwortlichkeiten vor und nach der TPM-Einführung /2/

Instandhaltungsprogramm

Das Instandhaltungsprogramm unterstützt die geplante, vorbeugende und zustandsabhängige Instandhaltung.

Folgende Bausteine sollten in diesem Prozess implementiert werden:

- spezielle Checks der Instandhaltung/ Überholung/ Messungen,
- Integration von Empfehlungen/ Hinweisen des Herstellers und internem Wissen,
- an Produktionspausen angepasstes Instandhaltungs-Schichtsystem für optimalen Zugang,

- Dokumentation aller Maßnahmen des Instandhaltungsprogramms.

Verantwortlich ist die Instandhaltung. Die Aktivitäten umfassen:

- Routine-Inspektionen,
- Systeme zur Zustandsmessung,
- Ausfallanalysen.

Daraus resultieren eine Kapazitätserhöhung und eine Verlängerung der Maschinenlaufzeit.
Schulung und Training

Das Schulungs- und Trainingsprogramm soll die Flexibilität und Vielseitigkeit der Mitarbeiter absichern.

Mittels gesteuertem Training, d.h. Planung der Fähigkeiten und on-the-job-Training sowie Mentorenprogramme sollen die Mitarbeiter kontinuierlich weiterentwickelt werden, um eine Schnittmenge / Verantwortung entsprechend Abbildung 5-17 zu erreichen.

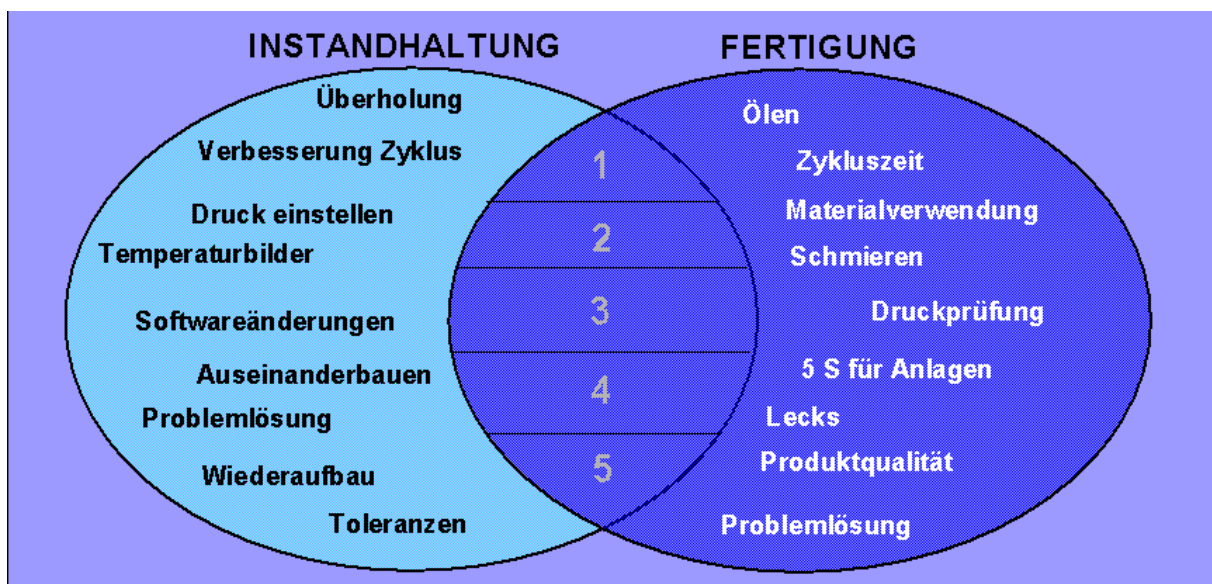


Abbildung 5-17: Schnittmenge /2/

Instandhaltungsprävention

Die Instandhaltungsprävention ist der letzte Schritt im Rahmen von TPM. Bei der Prävention werden die Erkenntnisse, Erfahrungen der Mitarbeiter bei der Beschreibung von Anforderungen an neue Anlagen und Maschinen berücksichtigt.

5.1.5 Problemlösung

Mit der Überschrift „Problemlösung“ ist ein systematischer Prozess definiert, der es erlaubt

- die bestehende Situation klar zu verstehen,
- die Wurzel der Probleme zu erkennen,

- Gegenmaßnahmen einzuleiten, die verhindern, dass das Problem wieder auftritt /2/.

Daher sollten alle Ebenen der Organisation eingebunden und Best-Practice-Vorgehensweisen ausgetauscht werden.

Ziel ist es dabei, Qualität, Kosten, Liefererfüllung und Prozessstabilität zu verbessern.

Bei der Definition des Problems sollten drei Faktoren (siehe auch Abbildung 5-18) berücksichtigt werden:

1. Der Standard – sagt uns wie die Leistung sein sollte.
2. Die Abweichung vom Standard – lässt uns die Größe des Problems erkennen.
3. Die vergangene Zeit – lässt uns die Historie und Trends erkennen.

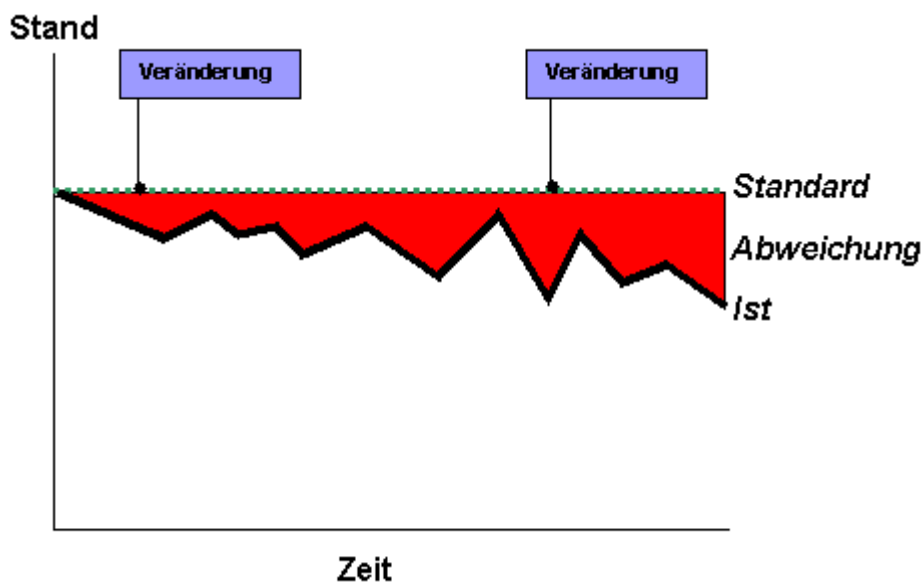


Abbildung 5-18: Erkennen von Abweichungen /2/

Zur Identifikation des Problem bietet sich das 3C-Problemlösungsmodell an (Abbildung 5-19).

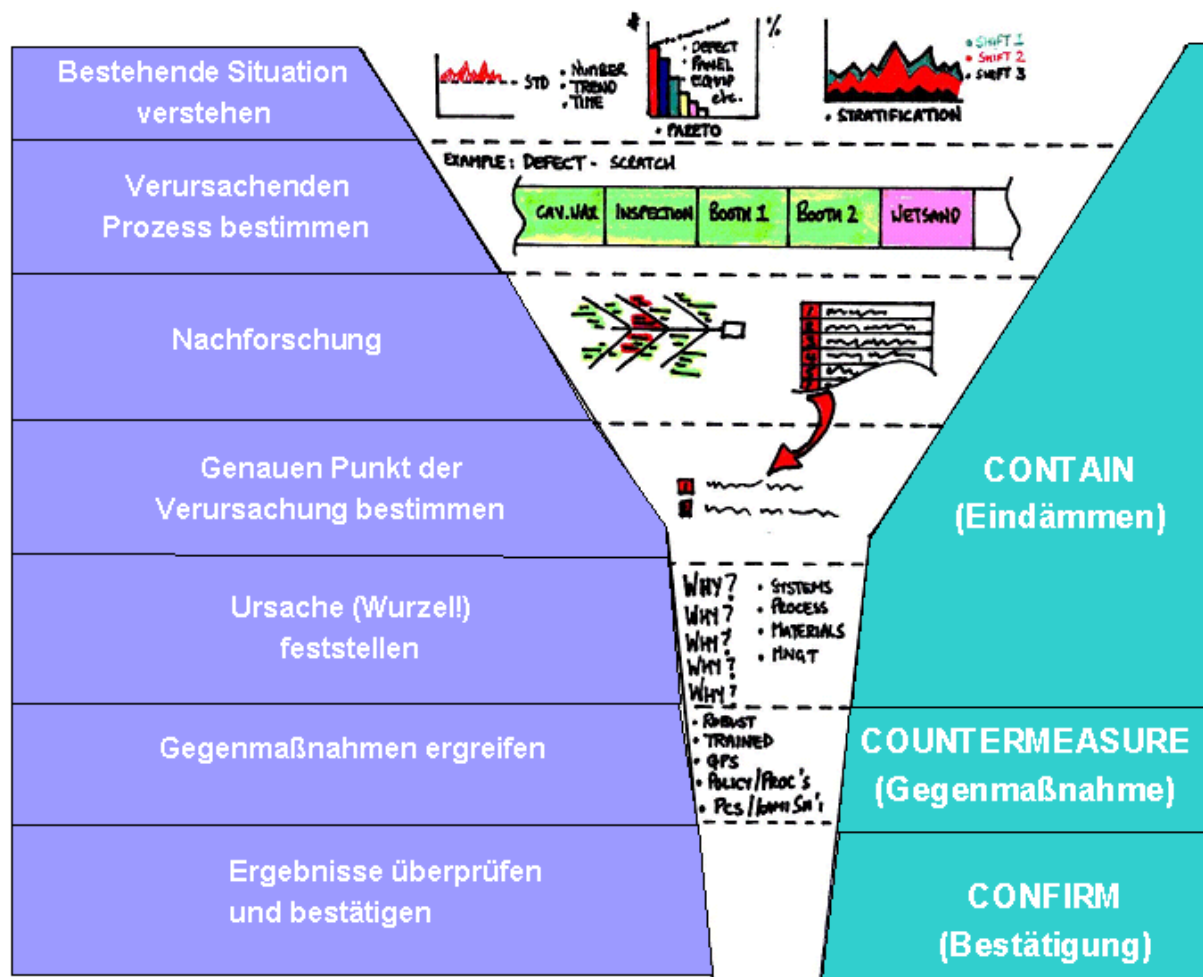


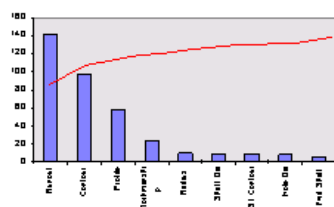
Abbildung 5-19: 3C-Problemlösungsmodell /2/

Wichtig ist hierbei, die bestehende Situation zu erfassen. Dies kann mittels Prüflisten, einer Pareto-Analyse oder eine SPC-Analyse erfolgen (Abbildung 5-20).

Fehler	Woche Nr.
Schweißen	
Schleifen	
Säubern	
Lackieren	
Verpacken	

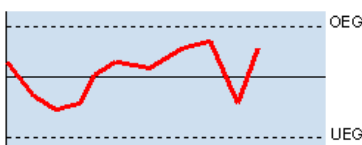
Prüflisten

Einfache Strichliste (5-Striche-Blöcke), um Art und Anzahl festzuhalten



Pareto-Analyse (ABC-Analyse)

Priorisierung von Problemen / % von allen Problemen



Statistische Prozesskontrolle (SPC Statistical Process Control)

Trend/ Steuerung mit oberer und unterer Eingriffsgrenze/ Toleranz

Abbildung 5-20: Methoden zur Analyse der Ist-Situation /2/

Ist daraus das Problem nicht erkennbar, so gibt es weitere Problemlösungswerkzeugen die hier nicht näher erläutert werden sollen. Dies sind z.B.:

- FMEA (Fehler-Möglichkeiten-und-Einfluss-Analyse),
- Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm),
- Datenanalyse,
- A3 Problemlösungs-Rahmen,
- 5-Warum-Analyse.

Mit dem Modul Problemlösungen lassen sich somit analytische Ansätze / Methoden zur Problemlösung anwenden, die den Prozess wieder zum Standard zurückführen oder aber einen neuen verbesserten Standard ermöglichen.

5.1.6 Qualität

Die Qualität ist ein unverzichtbares Modul im Rahmen von Lean Manufacturing und der Stabilisierung von Prozessen.

Dabei wird zugrunde gelegt, dass die erzeugte Qualität bzw. Qualitätsprüfung am Ende der Fertigungslinie niemals eine 100%-Qualität für den Kunden sicherstellt.

Einfluss auf die Qualität haben nach Abbildung 5-21 maschinenbezogene und personenbezogene Aspekte.

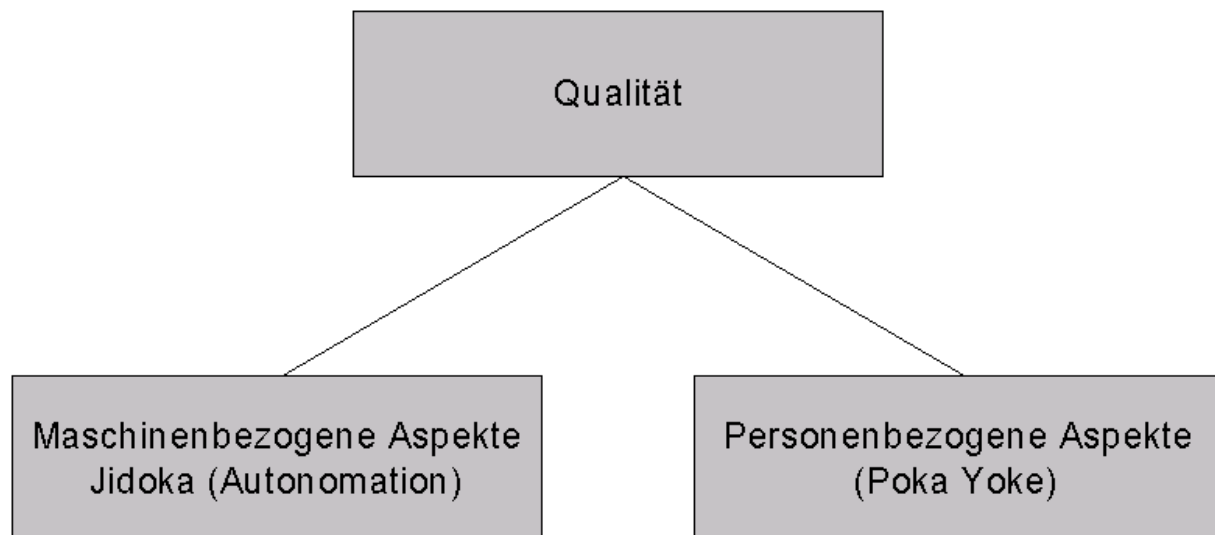


Abbildung 5-21: Einfluss auf Qualität /2/

Maschinenbezogene Aspekte

Der Begriff „Jidoka“ bedeutet übersetzt „Maschinen mit menschlicher Intelligenz“. Es handelt sich hierbei um eine Art künstliche Intelligenz, die es ermöglicht, dass die Maschine Fehler und Abweichungen erkennt und diese anzeigt. Die Arbeit bzw. der Prozess wird angehalten, wenn eine Abweichung zum Normalzustand auftritt.

Hintergrund dieser Vorgehensweise ist die Erkenntnis, dass die Wertschöpfung am Bauteil nicht linear verläuft. Dies trifft insbesondere auf die CFK-Einzelteilherstellung zu, siehe hierzu Abbildung 2-10.

Personenbezogene Aspekte

Der Ansatz bei den personenbezogenen Aspekten basiert darauf, den Standard des Prozesses so zu verändern, dass durch die Gestaltung menschliche Fehler vermieden werden. Eine häufig angewendete Vorgehensweise ist das Poka-Yoke-Prinzip.

Durch die fehlersichere Gestaltung des Prozesses in Geometrie und Stückzahl können z.B. Verwechslungen vermieden werden.



Abbildung 5-22: Poka-Yoke am Beispiel eines Montagetaktwagens (Quelle: Airbus)

Zur Stabilisierung von Prozessen eignen sich insbesondere Prozesszwangsabläufe, bei denen Schritt 2 nur nach einer Quittierung von Schritt 1 vollzogen werden kann.

5.1.7 Just in Time

„Just in Time“ bezeichnet ein Produktionssteuerungsprinzip, das mit minimalen Puffern und nach dem Kanban⁵⁰-Prinzip arbeitet.

In der Industrie finden wir heute zwei gemäß Abbildung 5-23 organisierte Produktionssysteme.

⁵⁰ Kanban ist eine Methode der Produktionsablaufsteuerung nach dem Pullprinzip (auch Holprinzip oder Zurufprinzip) und orientiert sich ausschließlich am Bedarf einer verbrauchenden Stelle im Fertigungsablauf.

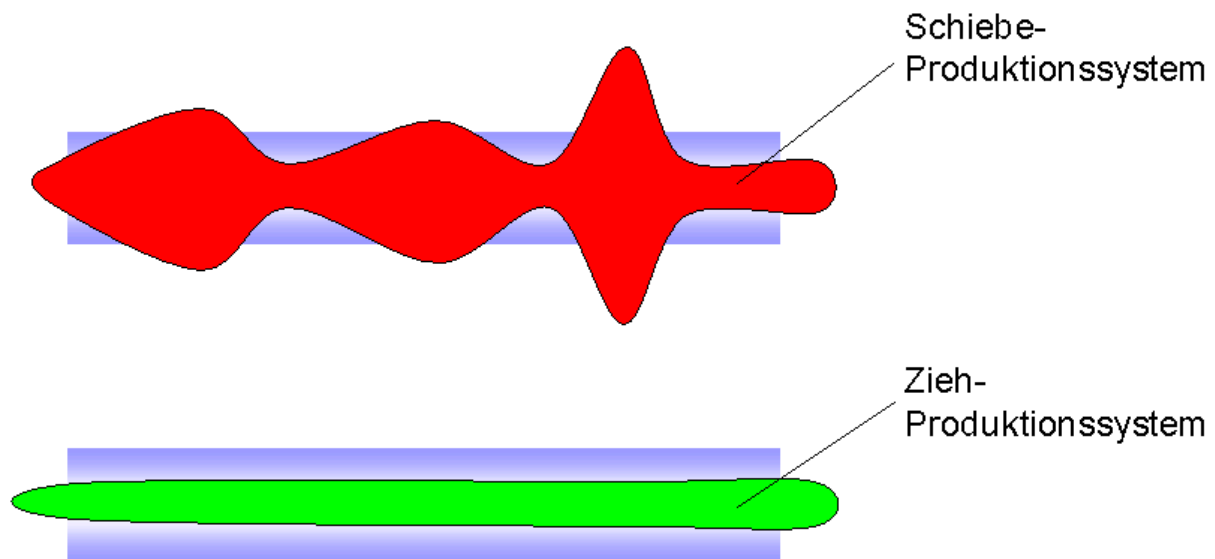


Abbildung 5-23: Schiebe- und Zieh-Produktionssystem /2/

Schiebe-Produktionssystem

Beim herkömmlichen Schiebe-Produktionssystem (push) schiebt der vorhergehende Prozess die Bauteile auf Basis eines Produktionsplanes zum nächsten Prozess.

Der Produktionsplan wird üblicherweise unter Berücksichtigung einer möglichst hohen Maschinenauslastung erstellt. /2/

Daraus entstehen Produktionsstörungen und Abweichungen, wie z.B.

- Entstehung von Pufferlagern und Überproduktion,
- Konzentration der Maschinenbediener auf den Produktionsplan und nicht auf den Bedarf,
- Verdecken von Engpässen und anderen Problemen.

Zieh-Produktionssystem

Das Zieh-Produktionssystem, auch Pull-System genannt, arbeitet dagegen nach folgenden Regeln /2/:

- Nur die Endmontage erhält einen festen Produktionsplan.
- Der verbrauchende Prozess sollte vom vorhergehenden Prozess nur das bekommen, was auch benötigt wird.
- Kanban ist das Werkzeug, um ein solches Ziehsystem zu betreiben.

Abbildung 5-24 zeigt das Funktionsprinzip der Kanban-Steuerung.

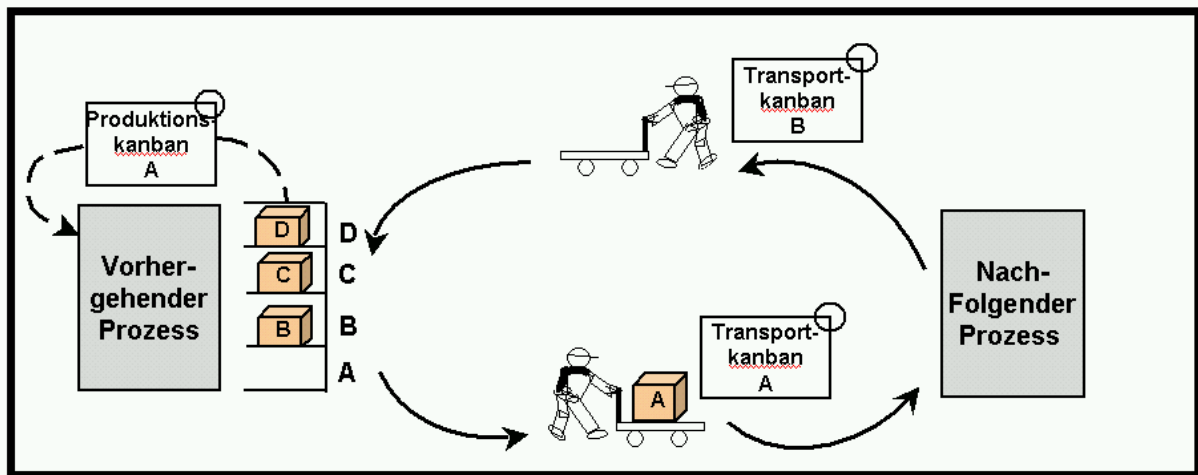


Abbildung 5-24: Prinzip der Kanban-Steuerung /2/

Somit ergeben sich für das Kanban-System folgende Vorteile:

- Es entsteht ein Kommunikationssystem zwischen den Prozessen.
- Jedem vorhergehenden Prozess werden Anweisungen aufgrund des tatsächlichen Zustands und nicht des Plans gegeben.
- Eine Überproduktion wird verhindert.
- Die Priorität wird auf das Wiederauffüllen gesetzt.
- Die Methode bringt Transparenz in den Materialflusses hinsichtlich Lager, Anlieferplätze, Standardmengen, Behälterart, Transportmethoden, Häufigkeit und Zeitpunkt.
- Eine Kanban-Planungstafel zeigt den Status der Produktion.

Das „Just in Time“-Prinzip kann unter Verwendung des Pull-Systems Schwachstellen oder auch Instabilitäten im Fertigungsprozess aufzeigen.

Insbesondere Qualität, technische Probleme oder Engpassmaschinen und Anlagen werden frühzeitig erkennbar.

5.1.8 Kontinuierliche Verbesserung / Kaizen⁵¹

Der kontinuierliche Verbesserungsprozess ist ein Prozess, um den bestehenden Standard in kurzer Zeit mit möglichst geringen Kosten / Investitionen auf ein neues höherwertiges Niveau zu heben (siehe Abbildung 5-25).

⁵¹ Kaizen bezeichnet einen Prozess zur ständigen Verbesserung von Prozessen.

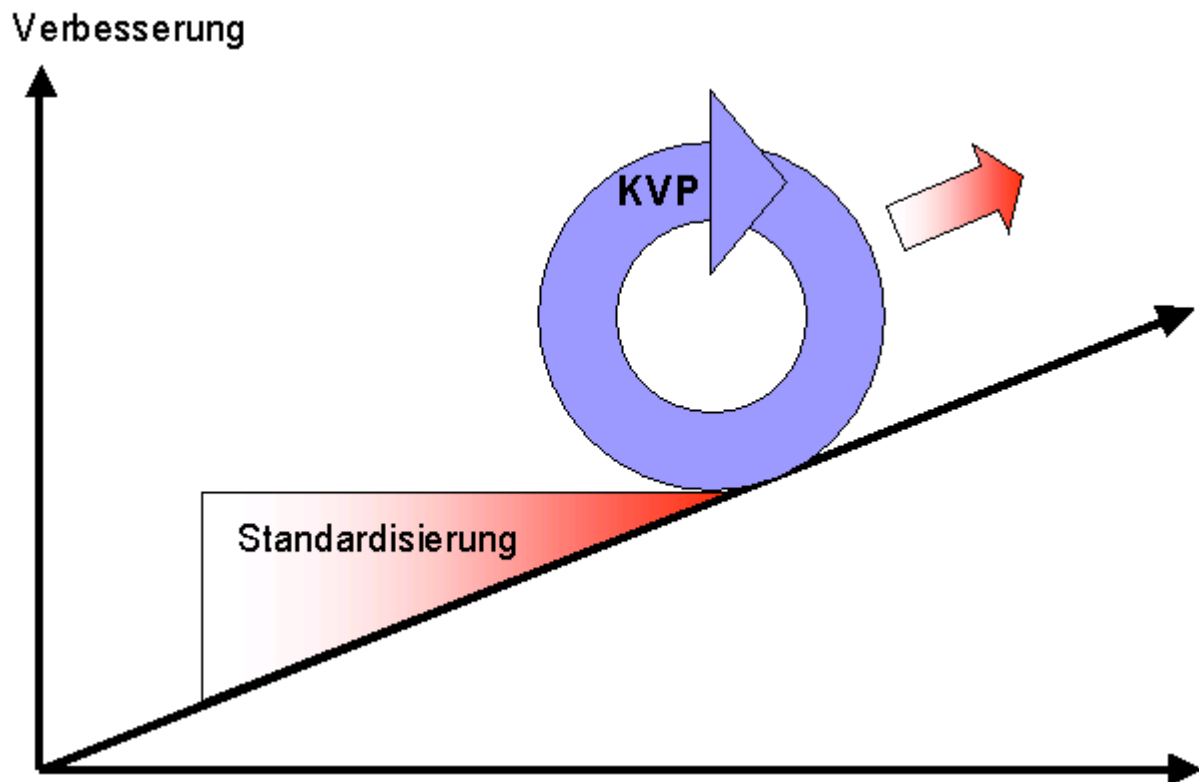


Abbildung 5-25: Standardisierte Arbeit /2/

Um dieses Ziel zu erreichen, sollte konsequent der in Abbildung 5-26 gezeigte Kaizen-Zyklus angewendet werden.

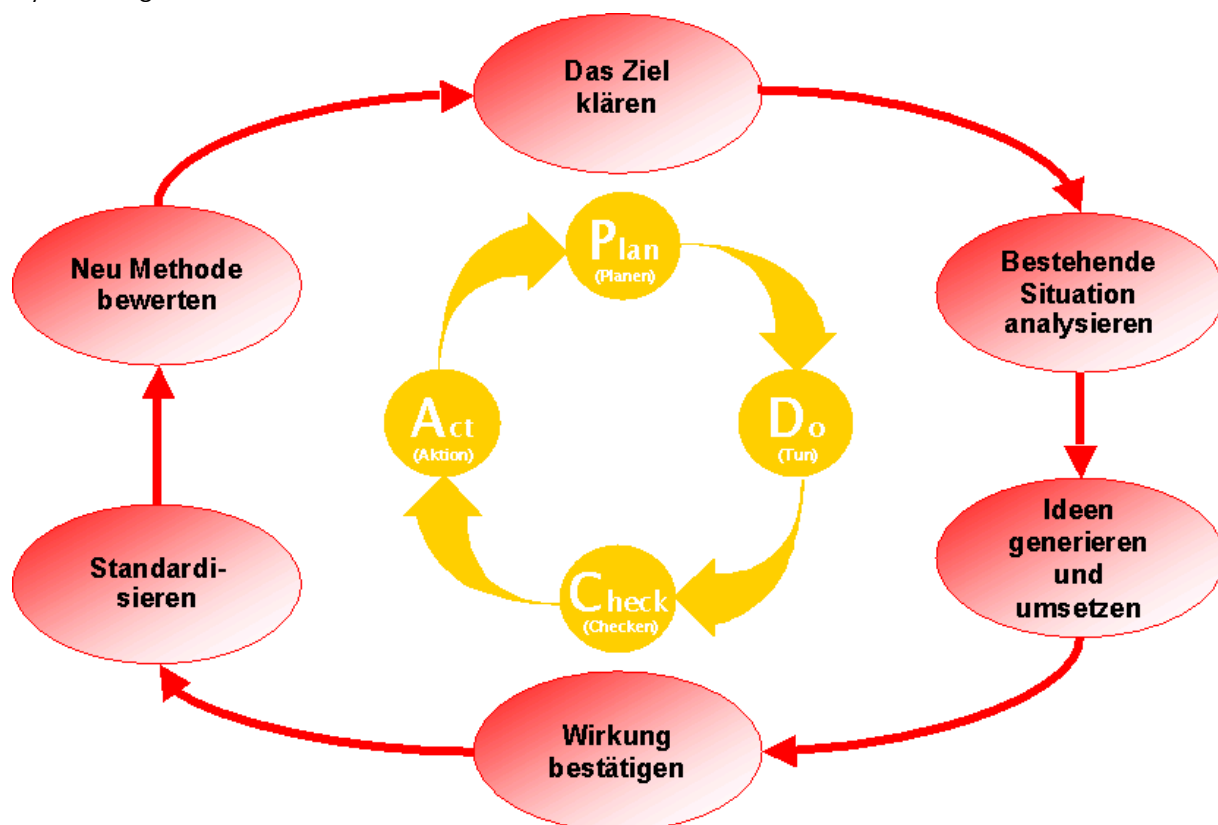


Abbildung 5-26: Kaizen-Zyklus /2/

Grundsätzlich wird zwischen zwei Arten von Kaizen unterschieden:

- Arbeits-Kaizen und
- Anlagen-Kaizen.

Beide Systeme verfolgen in einem kontinuierlichem Prozess die Optimierung der Arbeits- und Maschinenprozesse, dies sind unter anderem:

- Verbesserung der Effizienz,
- Kapazitätserhöhung,
- Verringerung von Ausschuss und Nacharbeit,
- Reduzierung der Ausfallzeiten,
- weniger Aufwand.

Wichtig für eine erfolgreiche Implementierung ist eine intensive Vorbereitung aller Beteiligten, d.h. Mitarbeiter, Maschinenbediener, Teamleiter und Produktionsleiter. Dies geschieht in der Regel durch mehrtägige abteilungsübergreifende Veranstaltungen mit multifunktionalen Teams.

5.1.9 Mensch im Mittelpunkt

In der CFK-Fertigung als auch in allen anderen produktionstechnischen Prozessen bestimmen der Mensch und die Maschine das Ergebnis.

Das Modul „Mensch im Mittelpunkt“ zeigt neue Managementstrukturen auf, die durch

- Übertragung von Verantwortung und
- Führen durch Vorbildfunktion.

ein neues Führungsverhalten implementieren. Nachfolgend (Abbildung 5-27) aufgezeigte Führungsregeln sollen dabei eingehalten werden.



Abbildung 5-27: Führungsverhalten /2/

5.1.10 Höchste Qualität, geringste Kosten

Im Rahmen der Einführung zu Lean Manufacturing bildet das Konzept „Höchste Qualität, geringste Kosten“ einen ganzheitlichen Ansatz, der nicht vom bestehenden Ist eine Optimierung anstrebt, sondern vom idealen Sollzustand, dem sogenannten „Blue-Sky“ oder auch „Grüne-Wiese-Planung“.

Bei der Methode „Blue Sky“ wird der Idealzustand beschrieben und eine Vision daraus entwickelt.

Das Funktionsprinzip ist in nachfolgender Abbildung 5-28 dargestellt und beschrieben:

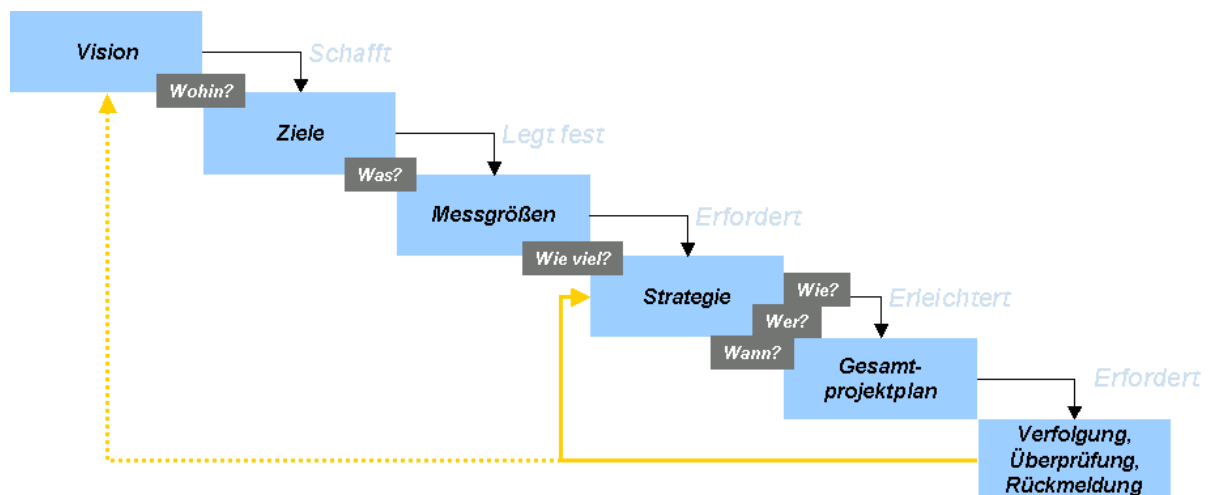


Abbildung 5-28: Blue Sky-Prinzip /2/

Der Vorteil dieses Management-Prinzips ist das Lösen vom Ist-Zustand, es wird der gewünschte Idealzustand definiert, unabhängig von bestehenden Einschränkungen. Danach erfolgt der Abgleich mit dem Ist-Zustand, es werden Ziele, Messgrößen vereinbart und dann über die Strategie und den Projektplan die Maßnahmen umgesetzt und geprüft. Insbesondere unter dem Aspekt der Stabilitätsoptimierung bei CFK-Prozessen lässt sich dieses Modul / Konzept zielgenau einsetzen.

Mögliche Einsatzschwerpunkte könnten z.B. sein:

- Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit von 85% auf 98%,
- Reduzierung der Ausschuss- und Nacharbeitsquote,
- Materialflussoptimierung,
- Gesundheit und Sicherheit,
- Just-in-Time Materialfluss.

5.2 Bewertung und Einführung von Lean Manufacturing

Die Entscheidung Lean Manufacturing-Ansätze in die Produktion einzuführen, bedeutet gleichzeitig die Standortbestimmung der bestehenden Produktion bzw. Organisation.

Die Vorgehensweise und Bewertung einer Produktion erfolgt idealerweise nach folgendem Schema:

- Vorbereitung des Audits,
- Darstellung der Ergebnisse im Radar-Diagramm,
- Durchführung einer SWOT⁵²-Analyse ,
- Erstellung eines Gesamtprojektplans.

Vorbereitung des Audits

Wichtig für das Audit ist die Wahl eines geeigneten funktionsübergreifenden Teams. Es sollten alle Arbeitsebenen, Funktionen und Abteilungen betrachtet werden.

Auch die Integration eines neutralen Beobachters ist eine sinnvolle Ergänzung.

Außerdem sollten alle Auditschritte geplant und der Auditumfang festgelegt werden.

Abbildung 5-29 zeigt die Dimensionen und Elemente einer möglichen Bewertung.



Abbildung 5-29: Dimensionen und Elemente einer Bewertung

Darstellung der Ergebnisse im Radar-Diagramm

Das Radar-Diagramm nimmt die acht Dimensionen der Befragung auf, siehe Abbildung 5-30.

Die Stufe 5 ist die maximal erreichbare Implementierungsstufe. (Hinweis: Toyota als Benchmark der weltweiten Industrie erreicht eine Wertung von max. 4,5-5,0. Die Flugzeugindustrie eine Wertung von 2,5-3,5 (Stand 2006).)

⁵² SWOT: Stärken-Schwächen-Analyse (Strength, Weaknesses, Opportunities, Threats)

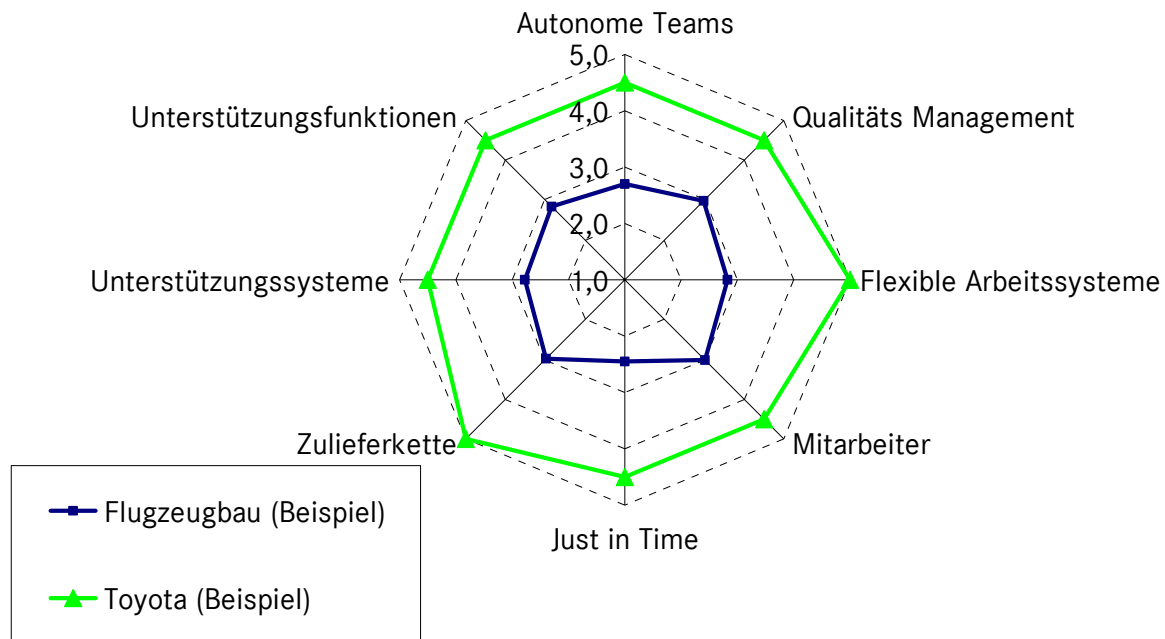


Abbildung 5-30: Radar-Diagramm

Der Durchschnittswert aller Einzeldimensionen ergibt dann die Gesamtpunktzahl der Bewertung.

Durchführung einer SWOT-Analyse

Nach der Bestandsaufnahme folgt eine Bewertung der Organisation hinsichtlich ihrer

- Stärken (strength),
- Schwächen (weaknesses),
- Chancen (opportunities) sowie
- Gefahren (threats),

auch SWOT-Analyse genannt.

Gesamtprojektplan aufstellen

Dieser Plan zeigt alle Aktivitäten über die Laufzeit auf, z.B.:

- Aufgaben / Tätigkeiten,
- Zeitplanung,
- Ressourcen (Menschen / Einrichtungen),
- Fortschritt zu den Planwerten,
- Bemerkungen zu Problemen und Gegenmaßnahmen.

Im Gesamtprojektplan sollte auch ein jährliches Audit aufgenommen werden, um die Prozessentwicklung zu verfolgen.

Laufzeiten von fünf Jahren sind zur Erreichung einer signifikanten Organisationsveränderung keine Seltenheit.

6 Bewertung neuer Prozesse

In der Industrie und damit auch in der CFK-Fertigung haben sich die Planungszyklen und Produktplanungszeiten erheblich reduziert, gleichzeitig wurde die Produktvielfalt erheblich erhöht.

Aus der Erkenntnis heraus, dass entsprechend Abbildung 6-1 in der Konzeptphase der maximale Planungsfreiheitsgrad bei minimaler Kostenauswirkung besteht, ist eine Fokussierung auf diesen Planungsschritt unbedingt empfehlenswert.

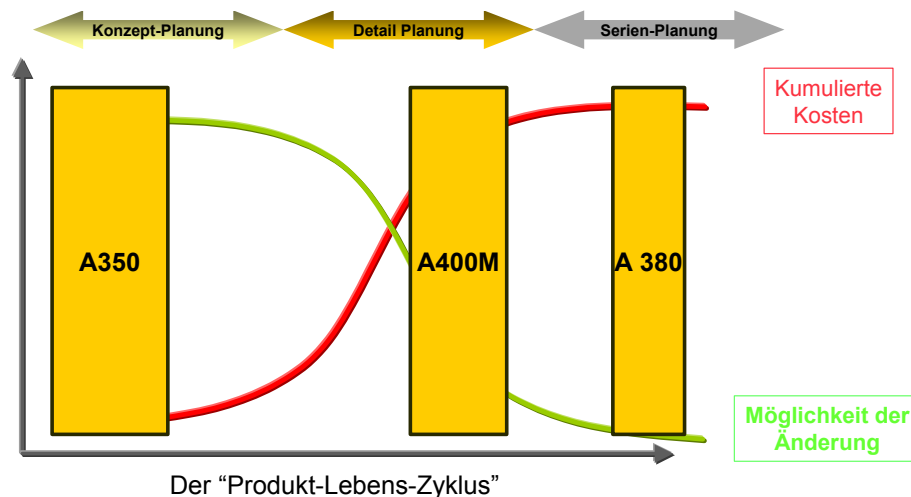


Abbildung 6-1: Produkt-Lebenszyklus am Beispiel von Airbus-Produkten (A350, A400M, A380) /1/

Unter dem Gesichtspunkt stabiler Fertigungsprozesse können in einer detaillierten und intensiven Planungsphase zukünftige Fehler und Prozessprobleme vermieden werden.

Mit der Entwicklung neuer Rechnersysteme und Softwaremodule besteht seit einigen Jahren die Möglichkeit die Projektierung, Gestaltung von Produktionssystemen und Fabrikanlagen mittels dem Prozesssystem

- digitale Fabrik bzw.
- digitale Fabrikplanung

intensiv zu analysieren und zu erforschen.

Werden heute noch sogenannte mock-up-Modelle im Maßstab 1:1 bzw. Testbauteile im Sollprozess gefertigt, so werden in der Zukunft durch das technologische Potenzial der digitalen Fabrikplanung und der damit verbundenen Hard- und Softwareleistung alle Prozesse detailgetreu digital nachgebildet und untersucht.

Die auf dem Markt verfügbaren Softwaremodule der digitalen Fabrikplanung lassen sich nach ihrer Funktionalität und der erforderlichen Produktionsstrukturierung in die Bereiche

- Layoutplanung,
- Arbeitsplatzgestaltung und

- Ablaufsimulation

gliedern.

Entscheidend für den Erfolg der digitalen Fabrik ist ein umfassendes Netzwerk an digitalen Modellen und Methoden. Ihr Zweck ist die ganzheitliche Planung, Realisierung, Steuerung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Fertigungsprozesse und –ressourcen in Verbindung mit dem Produkt. /19/

Somit lassen sich die Ziele der digitalen Fabrikplanung wie folgt formulieren:

- Erhöhung der Transparenz der Planungsprozesse,
- Beschleunigung des Informationsflusses,
- Erhöhung der Planungstiefe und –qualität,
- Verkürzung der Entwicklungszyklen.

Für die CFK-Teilefertigung als auch für die Montage mit ihren komplexen Prozessfolgen ist die digitale Fabrikplanung ein wichtiges Instrument der Prozessanalyse und damit zur Stabilitätsabsicherung im CFK-Produktionsprozess.

Im Nachfolgenden sollen die Bereiche Layoutplanung, Arbeitsplatzgestaltung und Ablaufsimulation in ihrem Aufbau und Funktion näher beschrieben werden.

6.1 Layoutplanung

Als Layout⁵³- oder auch Workflow⁵⁴-Planung wird die Organisation von Arbeitsabläufen durch Beschreibung und Festlegung abgrenzbarer und arbeitsteiliger Prozesse, die in einer definierten Reihenfolge, parallel oder sequentiell, ausgeführt werden, verstanden. Ziel von IT-gestützten Workflow-Management-Systemen ist, dafür zu sorgen, dass die jeweils anstehende Aufgabe zum richtigen Zeitpunkt den richtigen Mitarbeiter erreicht und er daher auch über die notwendigen Informationen verfügt. /19/

Um dies zu erreichen, ist ein geschlossenes Datenmanagement nach Abbildung 6-2 erforderlich.

Im Rahmen der strategischen Produktionsplanung werden die zukünftigen Anforderungen an das Produktionssystem hinsichtlich Produkttypen und Stückzahlen ermittelt. Anschließend werden die Organisations- und Produktionsprinzipien des zukünftigen Produktionssystems festgelegt. Danach erfolgt die Layoutplanung oder auch Anordnungsstruktur der Betriebsmittel über das Grob- und in einer späteren Stufe über das Feinlayout.

⁵³ In der Betriebswirtschaft ist das Layout die Bezeichnung für die innerbetriebliche Standortplanung und zeigt die räumlichen Anordnungsmöglichkeiten für u. a. Maschinen innerhalb eines Betriebs auf.

⁵⁴ Ein Arbeitsablauf oder englisch Workflow ist eine vordefinierte Abfolge von Aktivitäten in einer Organisation.

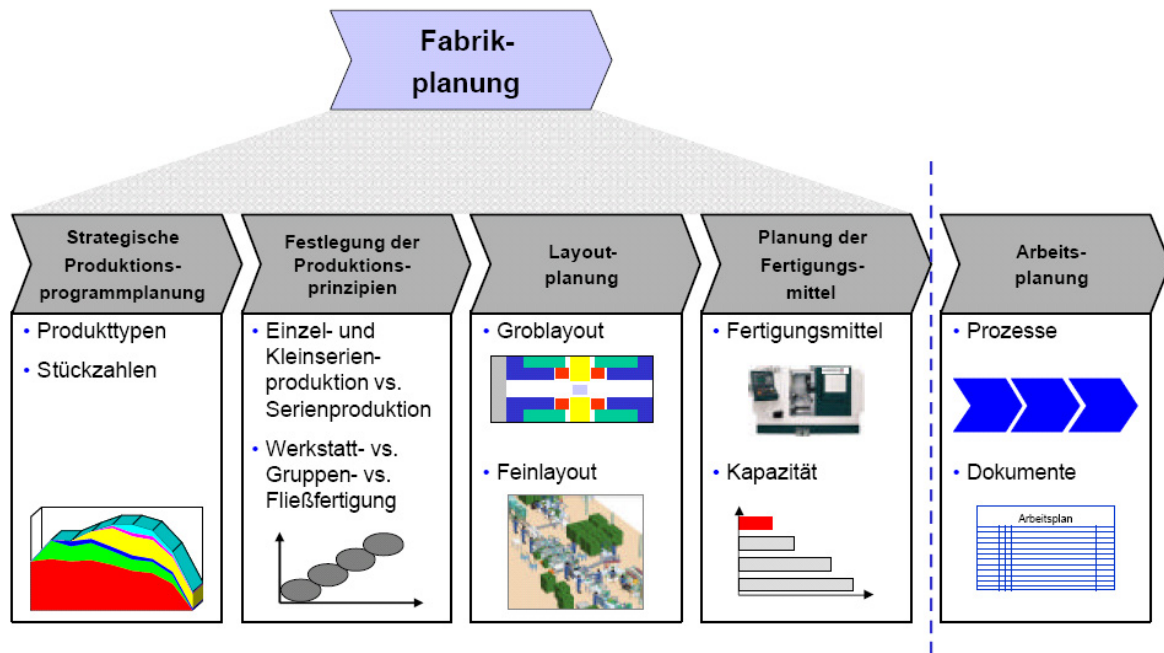


Abbildung 6-2: Datenmanagement /19/

Die Festlegung des Layouts ist eng verzahnt mit der Ermittlung von Art und Anzahl der benötigten Produktionsmittel.

Damit ist der Fabrikplanungsprozess abgeschlossen und es folgt dann die Arbeitsplanung mit den Inhalten „Prozessbeschreibung“, „Arbeitsplanerstellung“, „Qualitätsregeln“ einschließlich der Erstellung der notwendigen Dokumente. /19/

Wichtig für den eigentlichen Layoutprozess ist die Berücksichtigung und Identifikation von Prozessrestriktionen entsprechend Abbildung 6-3.

Prozessrestriktionen

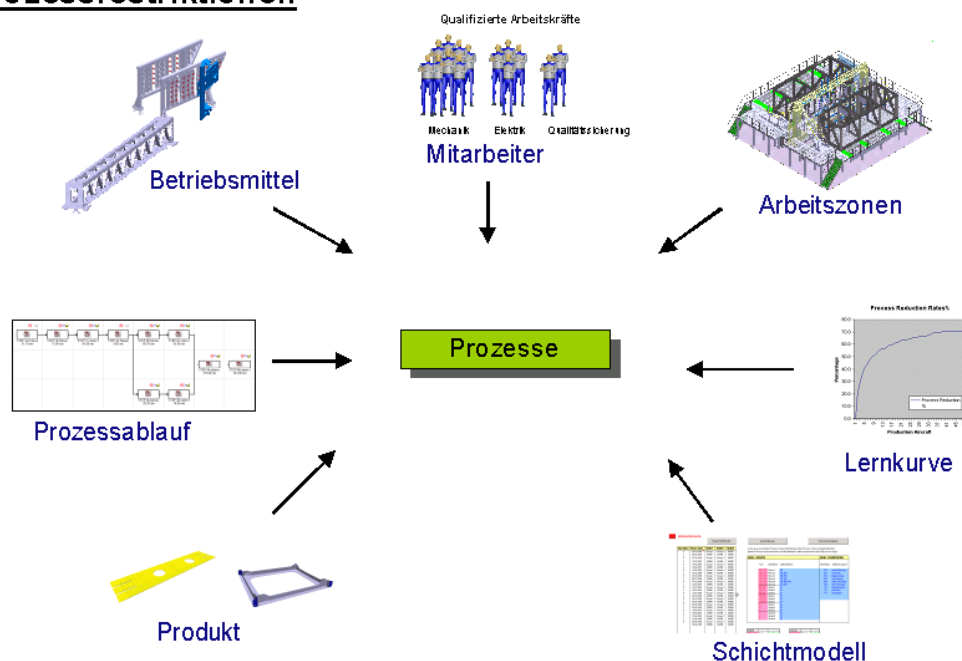


Abbildung 6-3: Prozessrestriktionen /1/

Sind alle Restriktionen beschrieben, so werden diese gemäß Abbildung 6-4 in den Prozessgraph eingearbeitet.

Prozessablauf festlegen

Prozesse nach technischen Restriktionen anordnen (Prozessgraph)

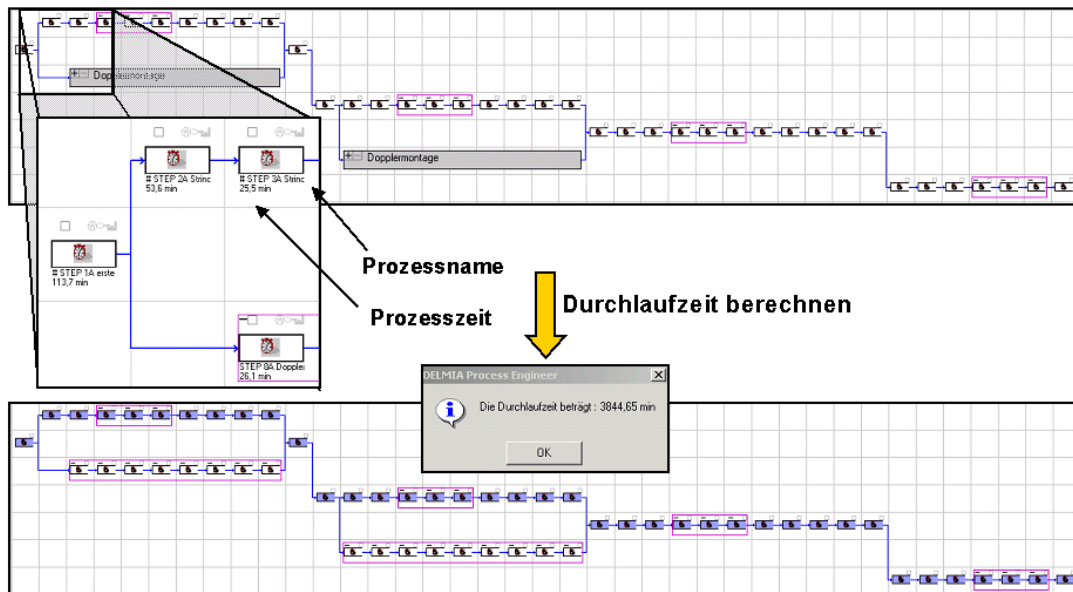


Abbildung 6-4: Festlegung des Prozessablaufes /1/

Über den Station- und Line-Balancer können dann die notwendigen Informationen für das Layout entnommen werden, wie z.B.

- Taktoptimierung hinsichtlich Ressourcenverbrauch und Durchlaufzeit,
- Linienoptimierung hinsichtlich der Anzahl der Takte.

Alle Informationen führen dann zum Layoutplan in 2D oder 3D.

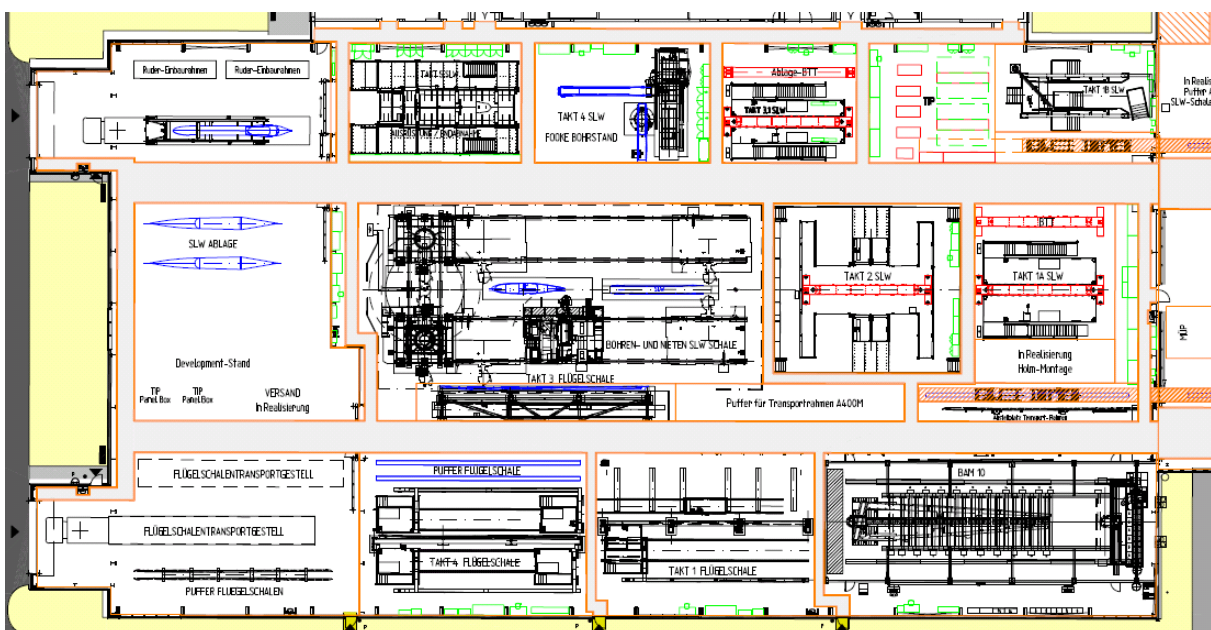


Abbildung 6-5: 2D-Layout der A400M-Montage (Quelle: Airbus)

Abbildung 6-5 zeigt einen 2D-Plan der A400M-Montage, Abbildung 6-6 einen 3D-Plan, der gleichzeitig als Kommunikationsinstrument gilt.

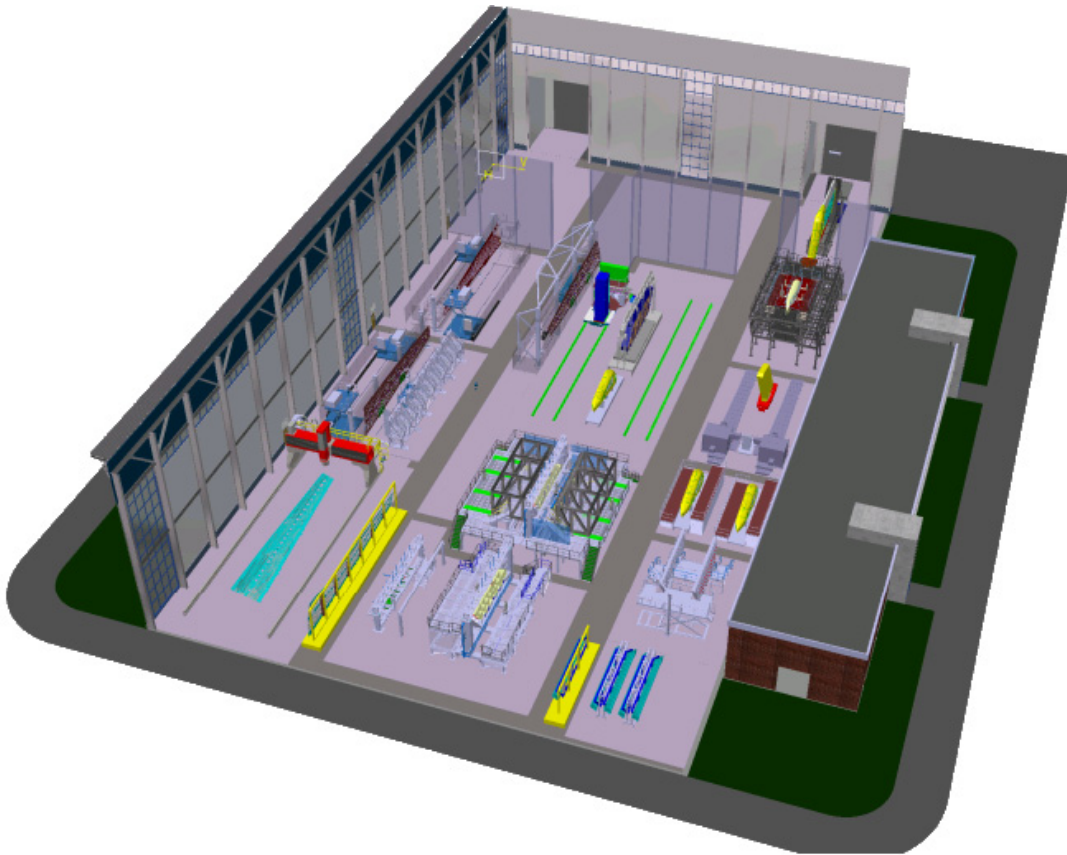


Abbildung 6-6: 3D-Layout der A400M-Montagehalle (Quelle: Airbus)

Die Layoutplanung ist somit die Ausgangsplanung für die Projektrealisierung und gleichzeitig Grundlage für die Arbeitsplatzgestaltung

6.2 Arbeitsplatzgestaltung

Die Arbeitsplatzgestaltung unterstützt zum Einen den Lean Manufacturing-Ansatz zum Anderen optimiert sie das Arbeitsumfeld des Menschen und stellt somit einen weiteren Schwerpunkt der Prozessoptimierung dar.

Die Einsatzfelder der entsprechenden Softwaretools beinhalten /7/:

- Bereichslayoutgestaltung,
- Materialfluss, Fördertechnik und Austaktung,
- Anordnung von Maschinen und Arbeitsplätzen,
- Arbeitsplatzgestaltung und Ergonomie,
- Montagegestaltung,
- grafische Simulation und Kollisionsprüfung.

Insbesondere die ergonomiegerechte Gestaltung von Arbeitsplätzen, Fertigungs- und Montageaufgaben ist Schwerpunkt der Arbeitsplatzgestaltung.

Die Ergonomieuntersuchungen zielen dabei auf eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Arbeitssysteme sowie eine Minderung der auf den arbeitenden Menschen einwirkenden Belastungen ab.

Hierbei helfen Simulationsprogramme, bei denen sich der Planer verschiedener Systeme bedient, wie z.B. Anatomieelemente, um den Arbeitsplatz möglichst schnell und sicher auszuliegen. /7/

Dieser Prozess, auch prospektive Ergonomie genannt (Abbildung 6-7), erlaubt eine exakte theoretische Analyse der Arbeitsumgebung bevor diese in reale Hardware umgesetzt wird.

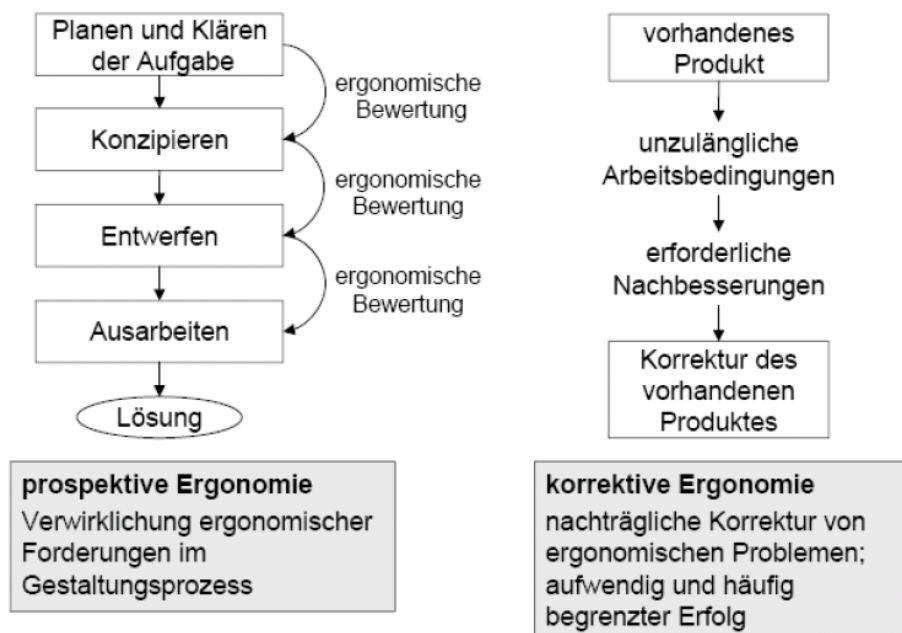


Abbildung 6-7: Perspektive und korrektive Ergonomie /7/

Mit der Realisierung des Projektes bzw. der industriellen Technik sind Veränderungen am Arbeitsprozess oder an der Hardware nur noch bedingt oder mit hohem finanziellen Aufwand möglich.

Der dazu erforderliche Prozess folgt in der Regel der in Abbildung 6-8 dargestellten Systematik.

Als veränderbare Größe sind hier zu nennen:

- das Produkt oder die Bauteile, z.B. durch die Verwendung anderer Montagetechniken,
- der Prozess, z.B. durch Verlagerung von Ausrüstungsmontagetätigkeiten in die Vormontage oder Änderung der Montagereihenfolge oder das Montageprinzip,
- die Ressourcen oder auch das Vorrichtungskonzept, z.B. durch Änderung der Handlinggeräte oder Erreichbarkeit der Tätigkeit.

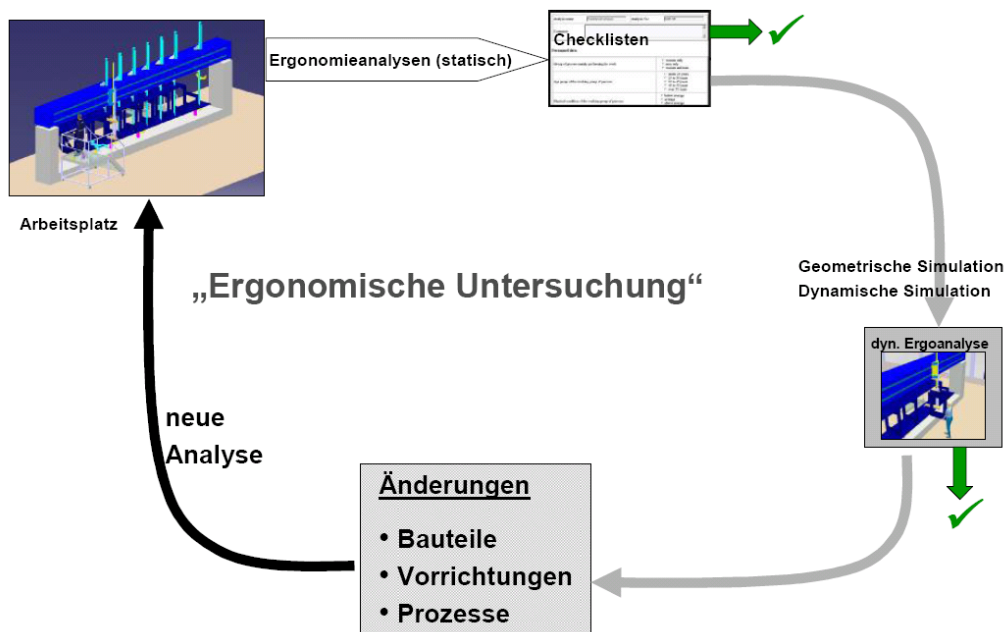


Abbildung 6-8: Systematik einer ergonomischen Untersuchung /7/

Abbildung 6-9 zeigt einige Beispiele aus dem Bereich Erreichbarkeit und Montagehaltung, hier am Beispiel der A400M-Seitenleitwerksmontage.



Abbildung 6-9: Beispiele zur Erreichbarkeit und Montagehaltung /1/

Für die Umsetzung der Verfahren kommen folgende Analysesysteme zur Anwendung:

- statische Verfahren, analytisch,
 - Checklisten,
 - NIOSH (National Institute for Occupational Health and Safety),

- H-A-S (Hand-Arm-System),
- Burandt/Schultetus,
- statische Verfahren, geometrisch,
 - Sehfeld, Greifraum,
 - Zugänglichkeit,
- dynamische Verfahren,
 - OWAS (Ovako Working Posture Analysing System),
 - Rula (Rapid Upper Limb Assessment).

Auf eine Beschreibung der einzelnen Verfahren soll an dieser Stelle verzichtet werden. Allerdings zeigen die Ergebnisse einer Simulation der realen Prozessumgebung und die analytischen Möglichkeiten der Arbeitsplatzgestaltung signifikante Einsparungen und eine verbesserte Prozessstabilität.

6.3 Ablaufsimulation

Der Begriff Simulation⁵⁵ wird in der VDI 3633 wie folgt definiert:

Simulation ist die Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.

Es geht also darum, in einem Modell unter dem kontrollierten Risiko eines Fehlschlags ein mit theoretischen Erwartungen belastetes Experiment durchzuführen.

Benötigt werden dafür:

- ein Modell,
- ein methodisches Vorgehen zur Erzeugung gewollter Effekte sowie
- nützliche Daten. /7//19/

In der Simulation wird das Verhalten komplexer Systeme unter bestimmten Randbedingungen untersucht, um z.B. Bewertungen vornehmen zu können oder ein Verständnis des Systemverhaltens abzuleiten.

Simulation ist grundsätzlich nicht auf ein Fachgebiet beschränkt und kann an physischen sowie an rein gedanklichen Modellen stattfinden.

Im Bereich der Fabrikplanung werden insbesondere die

- grafische 3D-Simulation,
- Ablaufsimulation,
- FEM-Simulation und die

⁵⁵ von simulare (lat.) nachahmen, vortäuschen, nachbilden

- Mehrkörpersimulation

eingesetzt.

Den Schwerpunkt bildet allerdings die graphische 3D-Simulation sowie die Ablaufsimulation. Hierbei wird die 3D-Simulation für die Auslegung von Arbeitsbereichen von Maschinen oder Ergonomieuntersuchungen (siehe Kapitel 6.2) und die Ablaufsimulation für Materialflüsse, Steuerungsregeln und die kapazitive Auslegung von Betriebsmitteln eingesetzt.

Abbildung 6-10 zeigt den Ablauf einer Simulationsuntersuchung.

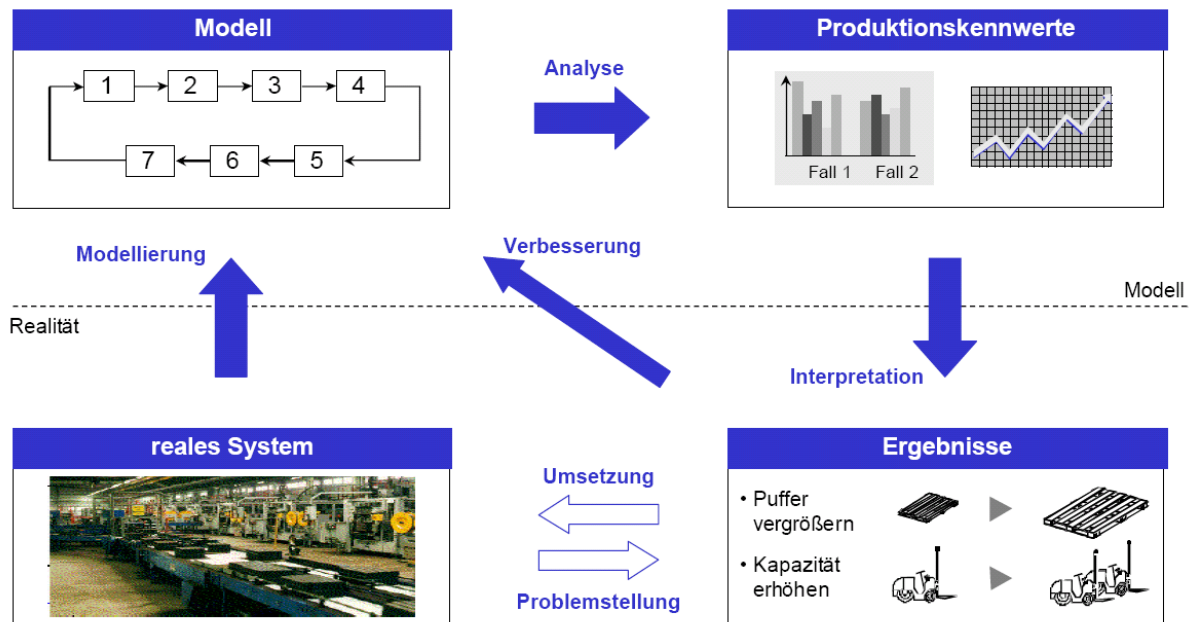


Abbildung 6-10: Ablauf einer Simulationsuntersuchung /19/

Dabei wird zunächst das reale System in einem Modell abgebildet. Die Modellierung eines Systems bedeutet immer eine verkürzte Wiedergabe der tatsächlichen Zusammenhänge. Es ist daher von großer Bedeutung, den Zweck und die Verwendung eines Modells zu beachten und danach die Regeln und Verkürzungen bei der Modellierung zu wählen. In der IT-unterstützten Simulation wird das Modell in Algorithmen beschrieben.

Untersuchungen, die mit dem Modell durchgeführt werden, führen zu Aussagen über das Verhalten des Systems unter bestimmten Randbedingungen. Die Vielzahl von Ergebnissen wird nach der Simulation verdichtet, zugeordnet und interpretiert, z.B. in Graphen oder Kennzahlen.

Die Analyse und Interpretation der Kennwerte führt zu Rückschlüssen auf einen Veränderungsbedarf am System.

Bei der Optimierung werden Veränderungen am Modell vorgenommen, so dass sich Aussagen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das Ergebnis machen lassen.

Die gewonnenen Erkenntnisse müssen auf ihre Realisierbarkeit und ihren Kosten- / Nutzenfaktor hin überprüft werden, um anschließend auf das reale System übertragen zu werden. Abbildung 6-11 zeigt den oben beschriebenen Ablauf in Form einer Ablaufsystematik.

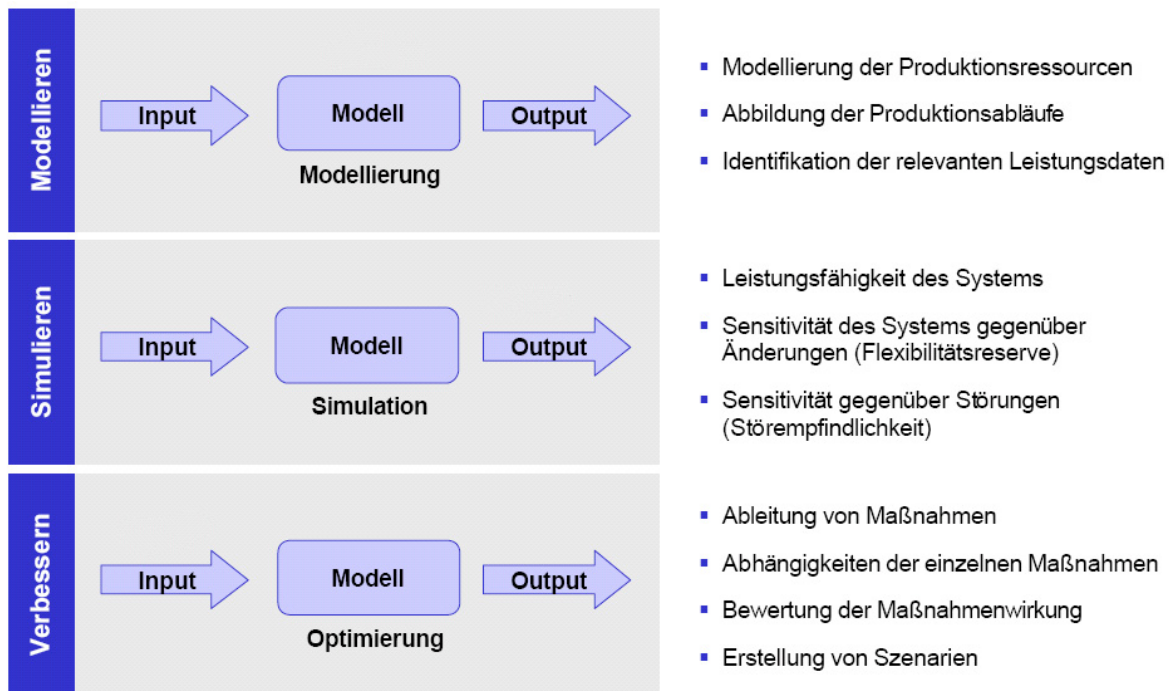


Abbildung 6-11: Teilschritte einer Simulationsuntersuchung /19/

Ein wichtiger Bestandteil der Zeitvariablen hängt immer von der Art und dem Ablauf des Prozesses ab. Sie beschreibt in welchen Abständen Veränderungen erfasst und sichtbar werden.

Die übliche Modellierungsform in der Prozesssimulation (Ablaufsimulation) ist die diskrete, ereignisorientierte Zeitmodellierung. Die abgebildeten Zeitpunkte werden dabei nicht durch konstante Intervalle vorgegeben, sondern durch ein Ereignis, wie z.B. das Eintreffen eines Werkstücks an einer Bearbeitungsstation. /19/

Abbildung 6-12 zeigt so ein Prinzipmodell, auch Warteschlangenmodell genannt.

Auf der Zeitachse werden dabei Punkte markiert, die eine diskrete Zustandsänderung im System bewirken.

Verteilungsfunktionen liefern die Ankunftsabstände der Einheiten und deren Bearbeitungsdauern. Der Bearbeitungsprozess beginnt, wenn die erste Einheit an der Station eintrifft und eine Station belegt. Jede weitere eintreffende Einheit wird in die Warteschlange vor der Station eingereiht, bis die Bearbeitungszeit der vorangegangenen Einheit abgeschlossen ist. Ist die Warteschlange leer und ist der Bearbeitungsvorgang der letzten Einheit abgeschlossen, wartet die Bedienstation bis zur nächsten Einlastung.

Modellierung der Vorgänge an einer Bearbeitungsstation:
diskrete, ereignisorientierte Simulation im Warteschlangenmodell

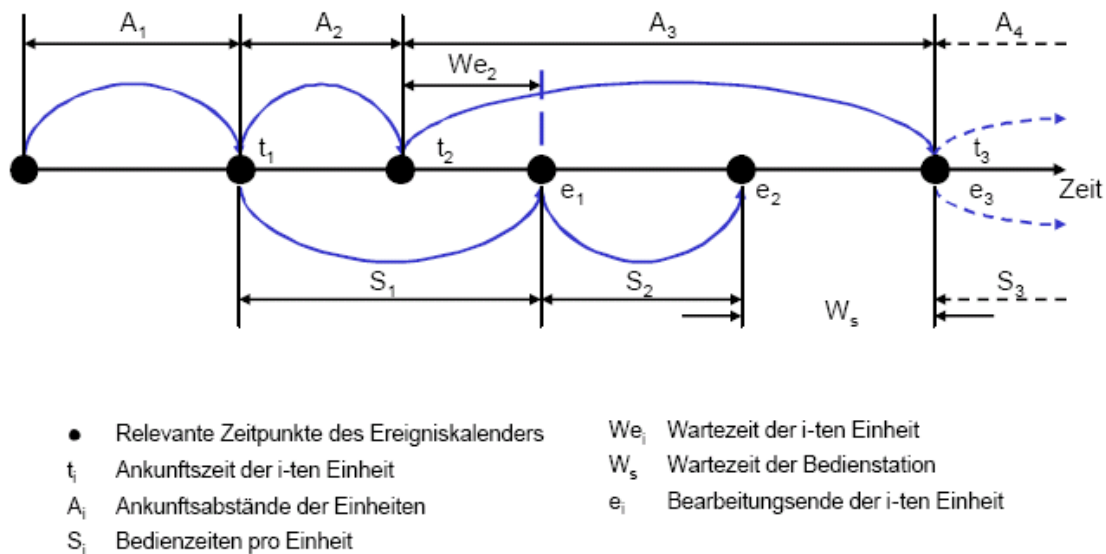


Abbildung 6-12: Warteschlangenmodell /19/

Mit dieser relativ einfachen Darstellung eines betrieblichen Prozesses lassen sich Extrema und Durchschnittswerte von Bearbeitungs- und Warteschleifen beschreiben und berechnen. Ausfall- und Störzeiten können über deterministische oder stochastische Zeitanteile berücksichtigt werden und verbessern das nahezu realistische Verhalten von fertigungstechnischen Zeitdauern. Auf diese Weise können Verfügbarkeit und Nutzungsgrad verschiedener verketteter Produktionseinheiten eines Produktionssystems simuliert und prognostiziert werden. /19/

Abbildung 6-13 zeigt ein einfaches Beispiel aus dem Bereich CFK-Fertigung mit den Elementen:

- Flow-Darstellung,
- Prozessplanung,
- Simulationsmodell,
- Modellverifikation.

Das dargestellte Beispiel zeigt den Fertigungsprozess mit den Prozessschritten

- Entformen nach dem Aushärtprozess im Autoklav (Demould Mould),
- Mechanische Bearbeitung (Milling),
- Ultraschallprüfung (NDT),

die Prozesszeit mit 5.820 Minuten sowie die Auslastung der Stationen.

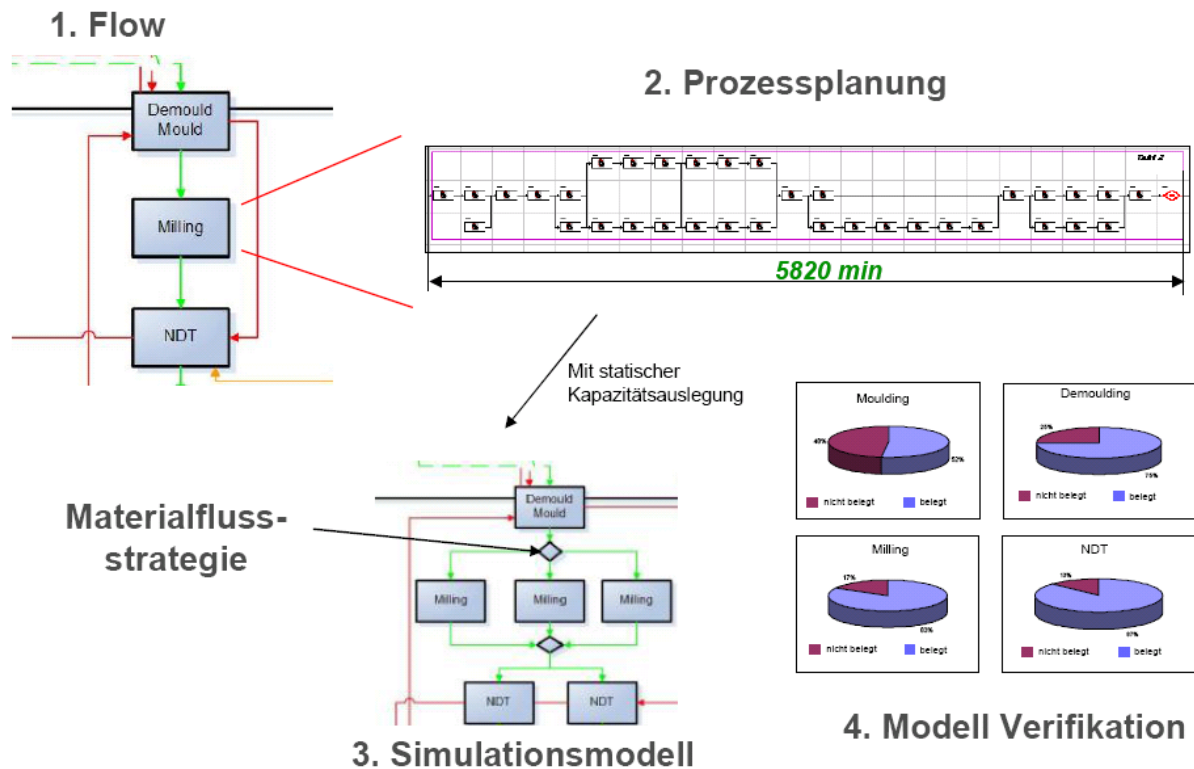


Abbildung 6-13: Beispiel einer Materialflusssimulation /7/

Der Prozess „Digitale Fabrikplanung“ gibt somit dem Planer und Anwender die Möglichkeit vor der Realisierung des Projektes die Schwachstellen, Engpässe, Durchlaufzeiten als auch technische Restriktionen wie Ergonomieprobleme und Kollisionen zu erkennen und abzustellen. Dies führt zum Einen zu Mehraufwendungen bei den Projektkosten, zum Anderen aber zu Kosteneinsparungen in den Bereichen Konstruktionsänderungen, Anlagenauslastung, Durchlaufzeitreduzierung und Projektlaufzeit.

Abbildung 6-14 zeigt das relative Ergebnis im A400M-Projekt des Airbus-Werkes Stade.

Einsparungen durch Digitale Fabrik

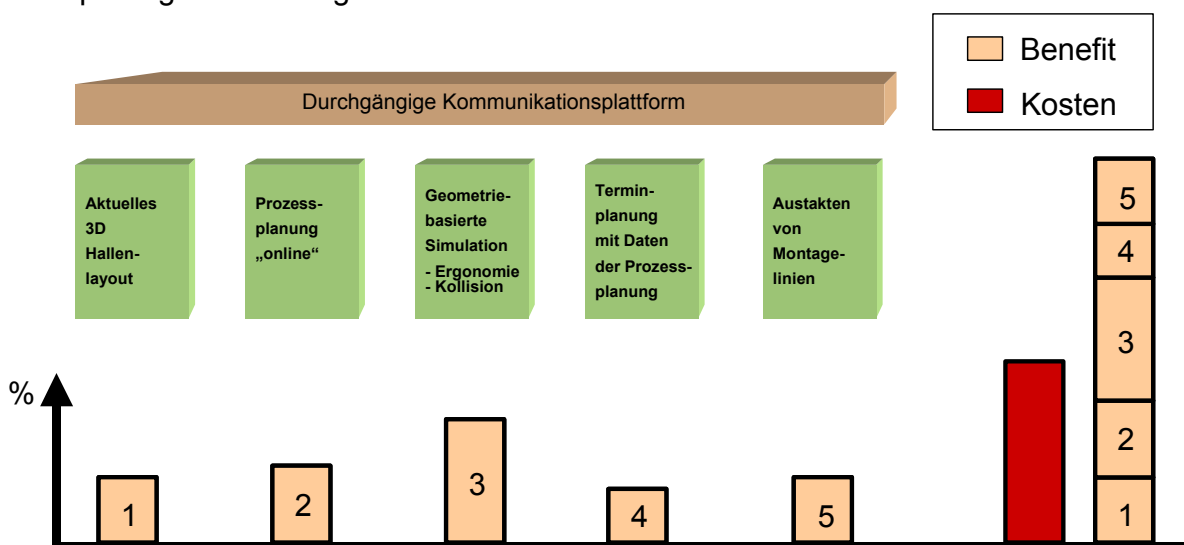


Abbildung 6-14: Einsparungen durch den Einsatz von digitalen Fabrikplanungswerkzeugen /1/

7 Zusammenfassung

Die konsequente Nutzung des Leichtbaupotenzials von Faserverbundwerkstoffen erfordert neue stabile Prozesse. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Zusammenspiel von Mensch, Maschine und Produkt (Abbildung 7-1), um daraus die Synergien für einen Beitrag zur Stabilisierung und Automatisierung von CFK-Produktionsprozessen zu erzielen.

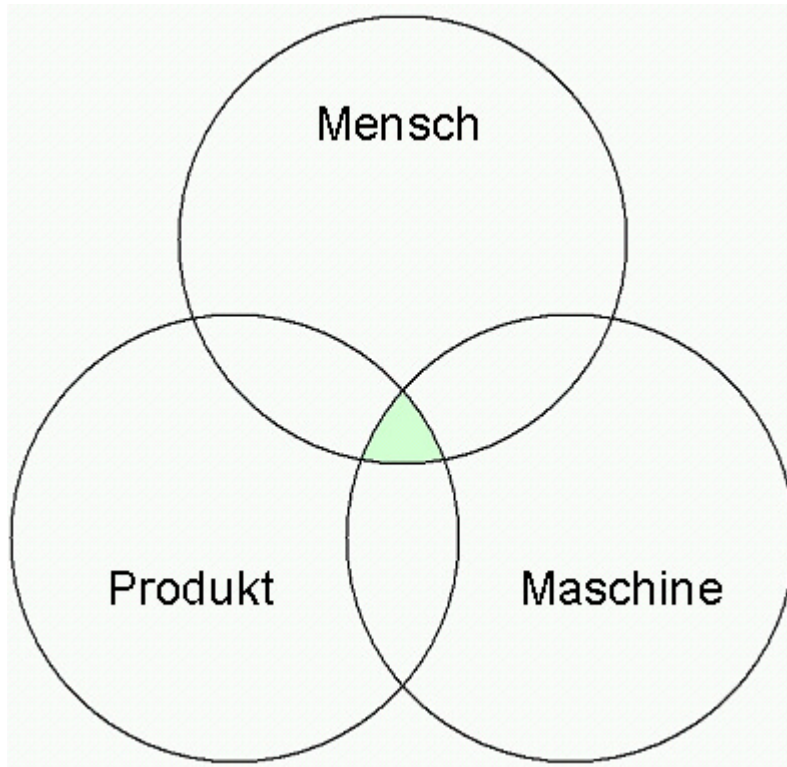


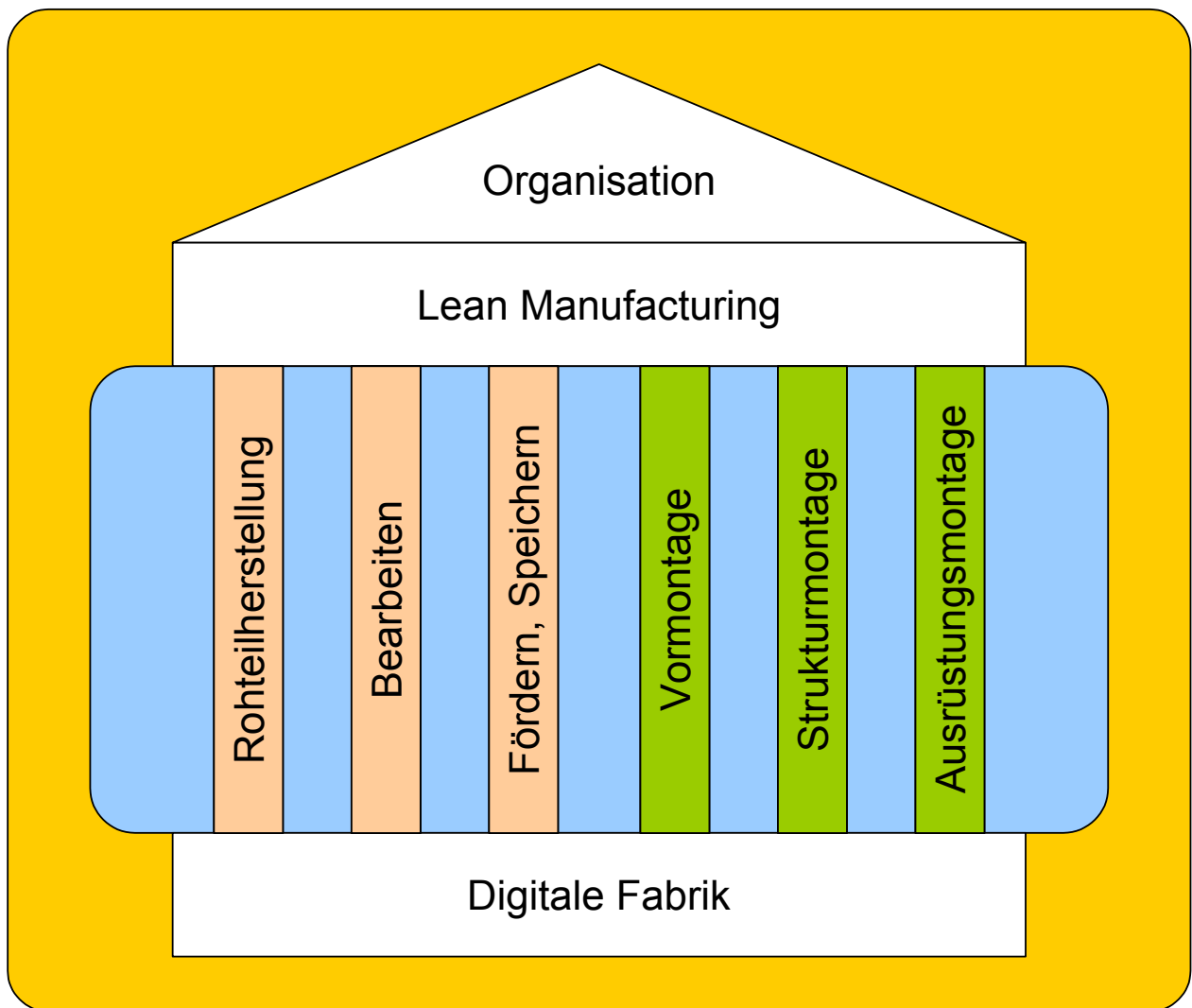
Abbildung 7-1: Zusammenspiel von Mensch, Maschine und Produkt

Das Konzept der Arbeit basiert dabei auf dem in Abbildung 7-2 schematisierten Häusermodell einer neuen technologisch abgesicherten CFK-Prozessstabilität.

Grundlage der Untersuchungen und Analysen sind zum Einen Mechanisierung und Automatisierungssysteme in der Teilefertigung und Montage und zum Anderen Managementsysteme zur organisatorischen und technologischen Absicherung des CFK-Produktionsbereichs der CFK-Teilefertigung wurden die Prozessschritte

- Fertigung Rohbauteil,
- Funktion Bearbeiten und der Bereich,
- Fördern und Speichern

untersucht.



Häusermodell der Prozessstabilität



Abbildung 7-2: Häusermodell der Prozessstabilität

In der Rohteilherstellung gibt es neue technologische Entwicklungen, die zu einer weiteren Komplexitätsreduzierung führen. Hier sind insbesondere neue automatisierte Tapelegerköpfe mit höherer Legeleistung in kg/h im ebenen und dreidimensionalen Bereich zu nennen.

Der Prozess Auto-Vac, eine Neuentwicklung für den automatisierten Schalen Aufbau, zeigt erstmalig einen industriellen Ansatz, den heute manuell durchgeführten Vakuum- bzw. Schalen Aufbau automatisiert durchführen zu können.

Für die Herstellung von komplexen 3D-Bauteilen in hohen Stückzahlen bis zu 20.000 Einheiten im Jahr wurde das Auto-RTM-System entwickelt. Der vollautomatisierte RTM-Prozess

bestehend aus Knickarmroboter, Mikrowellenerwärmung und hydraulischer Presse produziert die Bauteile in einem nachweislich stabilem Gesamtprozess.

Dem Fertigungsprozess folgend wurden für die Funktion „Bearbeiten“ ebenfalls neue Technologien analysiert und teilweise bereits eingeführt. Hauptsächlich sind hier die multiflexiblen Spannsysteme, die sich in Minuten jeder dreidimensionalen Bauteilform anpassen können, sowie die Bearbeitungsverfahren mechanische Fräsbearbeitung und das neue Wasserstrahlschneiden, welches insbesondere in der Umrissbearbeitung einen signifikanten Kostenvorteil darstellt und dabei die Randzone wärmetechnisch nicht beansprucht, zu nennen.

Eine weitere Neuentwicklung und damit in der CFK-Fertigung erstmals angewendete Technologie ist das Verfahren zu Oberflächenvorbereitung mit Hilfe von Laserstrahlen. Das mit Trennmittel behaftete Einzelbauteil muss vor dem Auftragen des Oberflächenschutzes von diesem sicher getrennt bzw. entfernt werden. Der in der Vergangenheit mittels manuellem Schleifen durchgeführte Prozessschritt wird durch das reproduzierbare Laserstripping-Verfahren sicher ersetzt.

Neben den eigentlichen Wertschöpfungsprozessen am Bauteil ist die Funktion „Fördern und Speichern“ ein wichtiger Bestandteil des Produktionsprozesses.

Mit der Auswahl des richtigen Transportkonzeptes werden die Bauteile sicher und ohne Beschädigungen mittels Pull-Prinzip durch den Fertigungsprozess geführt. In Abhängigkeit der Bauteilgröße eignen sich besonders Kransysteme in Verbindung mit Klemm- und Vakuumtraversen sowie Shuttle-Systeme für den hallenübergreifenden Transport.

Für den Montageprozess standen insbesondere

- die Vormontage,
- die Strukturmontage,
- die Ausrüstungsmontage

sowie die montagegerechte Produktgestaltung im Vordergrund der Untersuchungen. Die Auslegung von montagegerechten Komponenten basiert dabei auf folgenden Leitlinien für die Einzelteile:

- Komplexitätsreduzierung,
- Reduzierung der Teileanzahl,
- Lage- und Fügtoleranzen.

Gelingt dies, so können die nachfolgenden Automatisierungsmaßnahmen bzw. Anlagen technisch einfach und damit prozessstabil ausgeführt werden. In Kapitel 4.1.2 wurde hierzu ein durchgängiges Aufnahme- und Montagekonzept basierend auf Systembohrungen vorgestellt, welches vom Einzelteil bis zur Montage das Bauteilreferenzsystem darstellt.

Grundlage dieses Referenzsystems ist die in Kapitel 4.2 vorgestellte Automatisierung der Vormontage. Das Anlagenkonzept beinhaltet die Installation von zwei Standardknickarmrobotern. Die Montageaufgabe, Herstellung von 457 Bohrungen und 439 Clip / Schalen-Nietverbindungen erfolgt mit Hilfe der beschriebenen Roboter nach dem Master/Slave-Prinzip. Der Bearbeitungsprozess und damit die installierte Software kompensieren die geometrischen und temperaturabhängigen Ausdehnungskoeffizienten.

Das Ergebnis ist eine robuste prozesssichere Vormontage mit einer technischen Verfügbarkeit von mehr als 95%.

Mit der Bereitstellung der Einzelteile sowie der Komponenten aus der Vormontage beginnt der in Kapitel 4.3 beschriebene Strukturmontageprozess. Um diesen Prozess stabil und sicher führen zu können, ist eine klare Aufgaben- und Strukturaufteilung sinnvoll bzw. erforderlich. Mit der Zusammenführung der Komponenten in der Strukturmontagestation und der damit erreichten Komplexitätsreduzierung beginnt der eigentliche Strukturmontageprozess. Hierzu wird eine vollautomatische Nietanlage eingesetzt, die mittels Revolver-Endeffektoren und Nietauswahlsystem automatisch alle Blindnietverbindungen setzen kann. Ausrüststation und Endmontage / Teststation schließen den Strukturmontageprozess ab.

Die Ausrüstungsmontage ist in der CFK-Montage kaum automatisierbar. Die Komplexität der Montage erfordert allerdings transparente und standardisierte Abläufe.

Mit der Einführung von taktbezogenen, Flow-Line oder Moving-Line-Prinzipien lassen sich diese Anforderungen sicher umsetzen. Es entsteht somit eine stabile, flussorientierte, synchrone und ausnivellierte Produktion.

Wie bereits in Abbildung 7-2 dargestellt, beinhaltet die Prozessstabilisierung in den CFK-Produktionsprozessen nicht nur die Automatisierung sondern auch die Managementsysteme. Managementsysteme beschäftigen sich im Schwerpunkt mit dem Menschen im Prozess bzw. der Bewertung neuer Prozesse wie z.B. der digitalen Fabrikplanung.

Insbesondere mit der digitalen Fabrikplanung und den heute zur Verfügung stehenden voll integrierten Datenverarbeitungssystemen lassen sich umfassende Netzwerke von digitalen Modellen und Methoden aufbauen und über Simulation und 3D-Visualisierung darstellen. Ziel und Zweck ist die ganzheitliche Planung, Realisierung, Steuerung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Fabrikprozesse und Ressourcen in Verbindung mit dem Produkt.

Mit dieser Vorgehensweise können im virtuellen Umfeld der Fabrik Prozesse analysiert, optimiert und damit stabilisiert werden, bevor sie in die Realität umgesetzt werden.

Ausgehend von der Erkenntnis, dass der wertschöpfende Anteil während der Durchlaufzeit eines Bauteils nur 5% beträgt, stellt das Lean Manufacturing ein hohes Potenzial zur Stabilisierung und Verbesserung der Fertigungsprozesse dar.

Beim Lean Manufacturing handelt es sich um eine relativ neue Philosophie oder auch Kultur der Zusammenarbeit, wobei der Mensch im Mittelpunkt aller Produktionsprozesse steht.

Erstmals angewendet wurde dieses neue Produktionssystem bei Toyota in Japan. Im Flugzeugbau und im besonderen in der CFK-Produktion wurden diese Prinzipien angepasst und unter den zehn Kernthemen:

- TPM,
- 5S,
- Standardisierung,
- visuelles Management,
- Problemlösung,
- Just in Time,
- Qualität,
- Mensch im Mittelpunkt,
- kontinuierliche Verbesserung,
- höchste Qualität, geringste Kosten

definiert und beschrieben.

Die wichtigsten Kernelemente dieser Methode sind die

- Methoden und Werkzeuge,
- Verhaltensweisen und
- Kennzahlen.

Unterstellt wird, dass sich jeder Prozess verbessern lässt. Um dieses zu erreichen, werden Systematiken, Konzepte, Analyseprinzipien vorgestellt bzw. praxisnahe Anwendungen erläutert.

Voraussetzung ist, dass alle Beteiligten im Prozess integriert werden und dass das Erreichte dokumentiert wird.

Mit der Dokumentation des Ergebnisses soll ein neues höheres Produktionsniveau erreicht werden. Dieses wird dann zum neuen Standard erklärt und der Lean Manufacturing-Prozess beginnt von Neuem.

Handelt es sich beim Produktionssystem Lean Manufacturing noch um die Analyse einzelner Fertigungssysteme und Prinzipien, so bildet die Organisation entsprechend Abbildung 7-2 das Dach bzw. die Struktur der Zusammenarbeit in der Fabrik oder zwischen den Abteilungen ab.

Grundsätzlich kann zwischen den Organisationsformen

- Produktbezogene Organisation oder
- Prozessbezogene Organisation

unterschieden werden.

Bei der produktbezogenen Organisation folgt die Organisation dem Wertfluss Einzelteilfertigung oder Montage in einer Hand, während die prozessbezogene Organisation der Technologie Teilefertigung oder Montage mit der erforderlichen Schnittstelle zwischen Teilefertigung und Montage folgt.

Mittels Synthese beider Organisationsformen, siehe auch Kapitel 2.1.3 lassen sich die Vor- und Nachteile beider Systeme zum Optimum generieren.

Die vorliegende Arbeit zeigt somit neue technologische und organisatorische Ansätze, um im Rahmen der CFK-Produktion einen „Beitrag zur Stabilität und Automatisierung von CFK-Produktionsprozessen“ zu leisten.

8 Literaturverzeichnis

- /1/ Airbus Deutschland GmbH
Digitale Fabrik im Airbus Werk Stade
Internes Dokument, 2007
- /2/ Airbus Deutschland GmbH, Werk Stade
Einführung in Lean
Schulungsunterlage, 2007
- /3/ Airbus Deutschland GmbH, Werk Stade
Seitenleitwerke Kompakt,
Internes Dokument, 2006
- /4/ Axmann, B.
Analyse der Schnittkantenometrie sowie des Strahls beim Abrasivwas-
serstrahlschneiden
Diplomarbeit
Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, IPK Berlin,
1998
- /5/ Begemann, M.
Langfaserverstärkung im RIM-Verfahren
RWTH Aachen, 1989
- /6/ Brötje Automation GmbH
Pflichtenheft der A380-Nietanlage
Internes Dokument, 2006
- /7/ Dettmar, S.
Digitale Fabrikplanung
Vorlesungsmanuskript
PFH Göttingen, 2007
- /8/ Flemming, M.; Roth, S.
Faserverbundbauweisen – Eigenschaften
Springer Verlag, 2003
- /9/ Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.
Faserverbundbauweisen – Fasern und Matrices
Springer Verlag, 1995
- /10/ Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.
Faserverbundbauweisen – Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix
Springer Verlag, 1999

- /11/ Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.
Faserverbundbauweisen – Halbzeuge und Bauweisen
Springer Verlag, 1996
- /12/ Fritz, H. A.; Schulze, G.
Fertigungstechnik
Springer Verlag, 2004
- /13/ Herrmann, A.
Entwicklung eines Produktionskonzeptes für rahmenförmige CFK-Strukturen im
Flugzeugbau
Abschlussbericht
CTC GmbH, 2007
- /14/ Herrmann, A.
Neue Technologien für die automatisierte RTM-Fertigung
Abschlussbericht
CTC GmbH, 2006
- /15/ Hydro Control GmbH
Cooperating Robots to assemble large Carbon Fibre Structures
Internes Dokument, 2007
- /16/ Loxin 2002
Internes Dokument, 2007
- /17/ Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.
Konstruktionslehre.
Springer Verlag, 2003.
- /18/ Provost, M.J.
A general overview from an engine manufacturer
Rolls-Royce plc, 2000
- /19/ Schuh, G.
Produktionsmanagement: Digitale Fabrikplanung und Simulation
Vorlesungsmanuskript
WZL der RWTH Aachen, 2007
- /20/ SLCR Lasertechnik GmbH
Internes Dokument, 2007
- /21/ Utes, A.
Wasserstrahlschneiden von CFK-Bauteilen im Flugzeugbau
Diplomarbeit
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2007

9 Register

Abbildungsverzeichnisverzeichnis

Abbildung 2-1: Zulässige klimatische Bedingungen für Arbeitsräume	4
Abbildung 2-2: Produktbezogene Organisation	4
Abbildung 2-3: Führungsstruktur einer produktbezogenen Organisation	5
Abbildung 2-4: Prozessbezogene Organisation	6
Abbildung 2-5: Führungsstruktur einer prozessbezogenen Organisation	7
Abbildung 2-6: Optimierung der Organisationsform	8
Abbildung 2-7: Eigen- und Fremdfertigung in Abhängigkeit der Herstellungs- und Materialkosten	10
Abbildung 2-8: Aufgaben der Teilefertigung	10
Abbildung 2-9: Fertigungsschritte einer A400M-Flügelschale aus CFK	11
Abbildung 2-10: Vergleich der Wertschöpfungsprozesse am Beispiel einer A400M- Flügelschale (CFK vs. Metall)	12
Abbildung 2-11: Risikoanalyse einzelner Prozessschritte	13
Abbildung 2-12: Risikoanalyse von Teilprozessen	13
Abbildung 2-13: Aufgaben der Montage	15
Abbildung 2-14: Anforderungen an Bohrungen	16
Abbildung 2-15: Bohren von Mischpaketen	17
Abbildung 2-16: Notwendigkeit von Shim in Abhängigkeit der Spaltgröße /3/	18
Abbildung 2-17: Passniet /3/	19
Abbildung 2-18: Setzverfahren einer Lockbolt-Verbindung /3/	19
Abbildung 2-19: Schraubpassniet (Hi-Lok) /3/	20
Abbildung 2-20: Setzvorgang eines Hi-Loks	20
Abbildung 2-21: Blindniet (ABS) /3/	21
Abbildung 2-22: Gesetzter Blindniet /3/	21
Abbildung 2-23: Gesetzter Vollniet /3/	21
Abbildung 2-24: Vorderholm- (links) und Hinterholmvormontage (rechts) eines A380- Seitenleitwerks	22
Abbildung 2-25: Aufbau einer Torsionsbox am Beispiel eines Seitenleitwerks /3/	23
Abbildung 2-26: Montagekonzeptunterschiede zwischen metallischen und CFK-Strukturen	24
Abbildung 2-27: Schrumpfungsverhalten am Beispiel einer A400M-Flügelschale	24
Abbildung 2-28: Verschiebung von Profilen am Beispiel einer A400M-Flügelschale	25
Abbildung 2-29: Messung sowie Schnittbild einer Faserwelle	25

Abbildung 2-30: Asymmetrisches Profil auf einer CFK-Haut.....	26
Abbildung 2-31: Aufbau einer Seitenleitwerksmontagestruktur	26
Abbildung 2-32: Aktuator eines Airbus-Seitenleitwerks	27
Abbildung 2-33: Hydraulikleitungen an einem Airbus-Seitenleitwerk.....	27
Abbildung 3-1: Gantry-Prinzip (hier Fa. Torres, links) sowie Traversen-Prinzip (hier Fa. Ingersoll, rechts)	30
Abbildung 3-2: Prinzip eines Tapelegerkopfes (Quelle: Mtorres)	31
Abbildung 3-3: Randbedingungen für Rampen im Tapelegeprozess	33
Abbildung 3-4: Kantengeometrien – Beispiele für nicht geeignete Schnittkanten	33
Abbildung 3-5: Tapelegerkopf neuer Generation zum Legen ebener Bauteile	35
Abbildung 3-6: Verschnittoptimierung durch den Einsatz neuer Tapelegerköpfe.....	35
Abbildung 3-7: Beispiel einer Fibre-Placement-Anlage (Quelle: CTC GmbH).....	36
Abbildung 3-8: Zukünftiger Fibre-Placement-Kopf (Quelle: Mtorres GmbH).....	36
Abbildung 3-9: Formschale mit Positionierträger /13/	37
Abbildung 3-10: Auflegen und Fixieren der Vakuumfolie /13/	38
Abbildung 3-11: Drapieren der Vakuumfolie /13/	38
Abbildung 3-12: Einlegen der Stringer /13/.....	38
Abbildung 3-13: Auflegen des Hautlaminats /13/	39
Abbildung 3-14: Aufbringen der Siegelmasse /13/.....	39
Abbildung 3-15: Aufsetzen der Formschale /13/	39
Abbildung 3-16: Abnehmen der Formschale /13/	40
Abbildung 3-17: Versuchswerkzeug zum Drapieren von Folien sowie Funktionsprinzip /13/	40
Abbildung 3-18: Geometrie der Versuchsschale sowie Schnittdarstellung des Positionierträgers /13/.....	41
Abbildung 3-19: 3D-Modell der Abrollvorrichtung /13/.....	42
Abbildung 3-20: 3D-Modell der Fertigungszelle (links) sowie umgesetzte Fertigungszelle /13/	42
Abbildung 3-21: Prinzipbild einer vorkonfektionierten Stringer-Preform mit Hilfsstoffen und Formstück /13/	43
Abbildung 3-22: Stringergreifer /13/	43
Abbildung 3-23: Bereitstellung des MAG /13/	43
Abbildung 3-24: Layout einer Fertigungszelle /13/	43
Abbildung 3-25: Beginn des Ablegens /13/.....	44
Abbildung 3-26: Siegelband-Abroller /13/	44
Abbildung 3-27: Darstellung der möglichen Stossformen /13/	45
Abbildung 3-28: Aufbringen des Kittbandes /13/	45
Abbildung 3-29: Prozessdarstellung Demonstratorschalenfertigung /13/	46

Abbildung 3-30: Fertiges Rumpfschalenbauteil /13/	47
Abbildung 3-31: Herstellungsschritte des RTM-Verfahrens /14/	48
Abbildung 3-32: Belegte RTM-Form; hier: Höhenleitwerksschwinge eines Airbus A340 /14/	48
Abbildung 3-33: Prinzipskizze eines RTM-Aufbaus /14/	49
Abbildung 3-34: Aushärtungscharakteristik von RTM-Matrixsystemen /5/	50
Abbildung 3-35: Übersicht über die RTM-Prozesskette /14/	51
Abbildung 3-36: Skizze sowie Lage des Demonstratorbauteils /14/	52
Abbildung 3-37: Versuchsanlage im Technologiezentrum der CTC GmbH /14/	52
Abbildung 3-38: Auto-RTM Versuchsanlage /14/	53
Abbildung 3-39: Cutter-Tisch /14/	53
Abbildung 3-40: Kommissionierroboter /14/	54
Abbildung 3-41: Aufbau des Endeffektors /14/	55
Abbildung 3-42: Umformproblematik beim Einlegen der Zuschnitte /14/	55
Abbildung 3-43: Ablegen der Zuschnitte in das Preformwerkzeug /14/	56
Abbildung 3-44: Transportsystem /14/	56
Abbildung 3-45: Preform-Anlage (Vorderseite/Rückseite) und Preform-Werkzeug /14/ ...	57
Abbildung 3-46: Werkzeugkonzept /14/	58
Abbildung 3-47: Temperaturverlauf und Leistung während des Preform-Prozess /14/	58
Abbildung 3-48: Temperaturverlauf des RTM-Zyklus /14/	59
Abbildung 3-49: Konventionelles RTM-Werkzeug /14/	59
Abbildung 3-50: Auto-RTM-Werkzeugkonzept /14/	60
Abbildung 3-51: Auto-RTM-Werkzeug	60
Abbildung 3-52: Schematischer Aufbau RTM-Heizpresse /14/	61
Abbildung 3-53: Temperaturverteilung beim Erwärmen von Harz im Ofen /14/	61
Abbildung 3-54: Mikrowellenerwärmungskammer /14/	62
Abbildung 3-55: Harzinjektionsanlage mit Mikrowellenerwärmung und automatische Harzfalle /14/	62
Abbildung 3-56: Temperaturverteilung beim Erwärmen von Harz in der Mikrowellen- Injektionsanlage /14/	63
Abbildung 3-57: Injektionskopf der ACE-Variante /14/	64
Abbildung 3-58: Andockvorgang der Injektionskopfeinheit /14/	64
Abbildung 3-59: Einzelteile des Injektionskopf von ACE /14/	64
Abbildung 3-60: DSC-Kurve von unvernetztem RTM6-Harz /14/	65
Abbildung 3-61: Aushärtungszonen /14/	65
Abbildung 3-62: Funktionsprinzip ARTIM /14/	66
Abbildung 3-63: ARTIM-Werkzeugprototyp /14/	67
Abbildung 3-64: ARTIM Prototyp-Werkzeug nach Herstellung eines Bauteils /14/	68

Abbildung 3-65: Variantenvergleich /14/	68
Abbildung 3-66: Position des Deckels und der Kavität bei der Bauteilentnahme und Reinigung /14/	69
Abbildung 3-67: Vakuumeffektor /14/	69
Abbildung 3-68: Reinigungsprinzip bei Trockeneisstrahlen (Quelle: www.icecleaner.de) ..	70
Abbildung 3-69: Kontur- (links) und lagegebendes (rechts) Positionierelement.....	72
Abbildung 3-70: Prinzipskizze eines Zwei-Punktaufnahmesystems.....	72
Abbildung 3-71: Statisches Rastersystem (Prinzipskizze sowie Spannsystem der Fa. Loxin /16/)	73
Abbildung 3-72: Multiflexibles Spannsystem (Quelle: Fa. Torres)	73
Abbildung 3-73: Beispiele für während des Fräsprozesses aufgetretene Schäden (Ausfransungen, Delaminationen)	74
Abbildung 3-74: Tiefbett-Gantry-Bearbeitungsmaschine der Fa. MTorres	75
Abbildung 3-75: Bearbeitungsmaschine in Ständerbauweise der Fa. Forest-Line	76
Abbildung 3-76: Hochbett-Bearbeitungsmaschine der Fa. Fooke.....	76
Abbildung 3-77: Knickarmrobotersystem der Fa. Hydro-Control	77
Abbildung 3-78: Entwicklung der für die CFK-Bearbeitung eingesetzten Bohrermaterialien	77
Abbildung 3-79: Standmenge für verschiedene Bohrermaterialien	78
Abbildung 3-80: VHM-Werkzeug – Sichelbohrkopf.....	78
Abbildung 3-81: VHM-Werkzeug – Spiralbohrkopf.....	78
Abbildung 3-82: VHM-Werkzeug – Spiralbohrer mit eingelöteten oder eingesinterten PKD- Schneiden	78
Abbildung 3-83: Entwicklung der Standzeit in Abhängigkeit der Fasereigenschaften	79
Abbildung 3-84: Verfahrensvarianten beim Wasserstrahlschneiden	80
Abbildung 3-85: Funktionsprinzip der Druckerzeugung /21/	81
Abbildung 3-86: Am Schneidkopf mitgeführter Catcher zu Aufnahme des Wasserstrahls /21/	82
Abbildung 3-87: Rillennachlauf [Quelle: www.jitwaterjet.com]	83
Abbildung 3-88: Schnittfugenbreite.....	83
Abbildung 3-89: Versuchsbauteil /21/	84
Abbildung 3-90: Kombiniertes Fräs- / Abrasivwasserstrahlschneid-Portal	86
Abbildung 3-91: Abschleifen der Oberfläche mit Sandpapier	87
Abbildung 3-92: 5-achsengesteuerte Laserstripping-Anlage	88
Abbildung 3-93: Prinzipdarstellung des Laserstripping-Verfahrens	89
Abbildung 3-94: Versuchsergebnisse	89
Abbildung 3-95: Prozessschritte der Laserstripping-Bearbeitung /20/	90
Abbildung 3-96: Prozessmerkmale des Laserstripping-Prozesses /20/.....	90

Abbildung 3-97: Oberflächenvergleich (Schnitt)	92
Abbildung 3-98: Oberflächenvergleich in Abhängigkeit vom eingesetzten Verfahren und Material	92
Abbildung 3-99: Seitenleitwerksschale nach dem Laserstripping-Prozess	92
Abbildung 3-100: Prozessablauf	93
Abbildung 3-101: Produktlinienkonzept des Airbus-Werkes Stade	94
Abbildung 3-102: Krananlage	94
Abbildung 3-103: Shuttlesystem in der A350-Flügelschalenfertigung (Konzept)	95
Abbildung 3-104: Lasttraverse für den Transport von großflächigen Bauteilen	95
Abbildung 3-105: Klemm- und Vakuumaufnahmesystem	96
Abbildung 3-106: Transfershuttle	96
Abbildung 3-107: Materialspeicher im Bereich des Oberflächenschutzes	97
Abbildung 4-1: CFK-Torsionsbox eines Seitenleitwerks	99
Abbildung 4-2: Einzelteile zur Verwendung bei der aufgelösten Bauweise	100
Abbildung 4-3: Montagekonzept bei der aufgelösten Bauweise (Prinzip und A400M-SLW- Box)	100
Abbildung 4-4: Einzelteile bei der C-Holm-Bauweise	101
Abbildung 4-5: C-Holm-Konzept	101
Abbildung 4-6: Holmspur (Quelle: Airbus)	101
Abbildung 4-7: Positives Holmwerkzeug (Quelle: Airbus)	101
Abbildung 4-8: C-Holm-Anordnung für Blindniet- (links) und Hi-Lok-Verbindung (rechts)	102
Abbildung 4-9: Einzelteile für das Bauteilkonzept mit integriertem Randwinkel	102
Abbildung 4-10: Montageprinzip mit integriertem Randwinkel	103
Abbildung 4-11: Vielholmer-Bauteil am Beispiel einer Landeklappe (Quelle: Airbus) ...	103
Abbildung 4-12: Einbringen einer Systembohrung mit Hilfe einer Bohrfalle (Quelle: Airbus)	104
Abbildung 4-13: Referenzsystem einer 5-Achsen-Fräsmaschine (Quelle: Airbus)	105
Abbildung 4-14: Referenzaufnahmen in der Vormontage (Quelle: Airbus)	105
Abbildung 4-15: Werkzeugvorrichtung eines A380-Holmes (Quelle: Airbus)	106
Abbildung 4-16: Trennung des Einzelteils, hier Rippen-/Schalenverbindung	106
Abbildung 4-17: Verschleißplatten (Quelle: Airbus)	106
Abbildung 4-18: Seitenleitwerksschale vor und nach dem Vormontageprozess	108
Abbildung 4-19: Anlage zur Vormontage von SLW-Schalen /15/	109
Abbildung 4-20: Anlagenkonzept /15/	109
Abbildung 4-21: Eingesetzte Roboter /15/	110
Abbildung 4-22: Positioniertoleranz in Abhängigkeit vom Schwenkradius /15/	110
Abbildung 4-23: Toleranzreduzierung durch Kompensationsmaßnahmen /15/	111

Abbildung 4-24: Abweichung mit und ohne Temperaturkompensation /15/	111
Abbildung 4-25: Aufgabenverteilung zwischen Master- und Slaveroboter /15/.....	112
Abbildung 4-26: Endeffektoren-Schnittstelle /15/	113
Abbildung 4-27: Messendeffektor /15/	113
Abbildung 4-28 Bohrendeffektor /15/	113
Abbildung 4-29: Nietsetzendeffektor /15/	114
Abbildung 4-30: Endeffektor zum Setzen der Nietringe /15/.....	114
Abbildung 4-31: Flexible Bauteilvorrichtung /15/	114
Abbildung 4-32: Lagerplätze der Endeffektoren /15/	115
Abbildung 4-33: Werkzeuglagersystem /15/.....	115
Abbildung 4-34: Nietauswahlssystem /15/.....	115
Abbildung 4-35: Vibrationsauswahlssystem /15/	116
Abbildung 4-36: Passniet (Lockbolt) und Nietring (Collar)	116
Abbildung 4-37: Setzen der Ties sowie Anfahren der Position /15/	117
Abbildung 4-38: Längenbestimmung über die Drehmomentenkurve /15/.....	118
Abbildung 4-39: Setzen des Nietes /15/.....	118
Abbildung 4-40: Aufbau einer CFK-Torsionsbox	119
Abbildung 4-41: Prinzipbild der A380-SLW-Montage (Quelle: Airbus).....	119
Abbildung 4-42: Eigen- und Fremdfertigung in der A380-Seitenleitwerksfertigung (Quelle: Airbus)	120
Abbildung 4-43: Vorderholm-Vormontage eines A380-Seitenleitwerks (Quelle: Airbus)	120
Abbildung 4-44: Hinterholm-Vormontage eines A380-Seitenleitwerks (Quelle: Airbus).	121
Abbildung 4-45: Transferpalette mit Unter- und Obertraverse (Quelle: Airbus).....	121
Abbildung 4-46: Bodengeführter Shuttle in der A380-SLW-Montage (Quelle: Airbus) ..	121
Abbildung 4-47: Holm-Rippengerüst sowie in die Konturschablone eingelegte Seitenschale (A380) (Quelle: Airbus)	122
Abbildung 4-48: Konturschablone (Quelle: Airbus)	122
Abbildung 4-49: Nietsetzanlage der Fa. Brötje /6/	123
Abbildung 4-50: Prinzip der Nietanlage /6/.....	124
Abbildung 4-51: Integration von Reparaturplätzen /6/	124
Abbildung 4-52: Basisfunktionen des Revolver-Endeffektors /6/	125
Abbildung 4-53: Optionen des Revolver-Endeffektors /6/	125
Abbildung 4-54: Nietbeladestation /6/	126
Abbildung 4-55: Nietauswahlssystem und Nietkassette /6/	127
Abbildung 4-56: zulässige Delaminationen beim Bohreraustritt /6/	128
Abbildung 4-57: Lagetoleranz /6/	128
Abbildung 4-58: Anfasungstoleranzen auf der Setzkopfseite /6/	128
Abbildung 4-59: Anfasungstoleranzen auf der Senkkopfseite /6/	128

Abbildung 4-60: Spalt am Setzkopf /6/	129
Abbildung 4-61: zulässige Wölbung /6/	129
Abbildung 4-62: Ausrüststation mit seitlichen Scherenhubbühnen (Quelle: Airbus)	130
Abbildung 4-63: Montagetraverse (Quelle: Airbus)	130
Abbildung 4-64: Bearbeitungsmaschine zum Setzen von Verbindungsbohrungen (Quelle: Airbus)	130
Abbildung 4-65: Aufbau und Funktion von Lean-Manufacturing-Systemen /2/	131
Abbildung 4-66: Taktfertigung in der Ausrüstungsmontage der A320-Seitenleitwerke (Quelle: Airbus)	132
Abbildung 4-67: Poka-Yoke-System in der SLW-Montage (Quelle: Airbus)	133
Abbildung 4-68: Flow-Line in der Airbus Flügelausrüstung (Quelle: Airbus)	134
Abbildung 4-69: Flussorientierung in einer Flow-Line-Produktion	134
Abbildung 4-70: Prinzipdarstellung der Moving-Line in der A320-Ausrüstungsmontage in Hamburg (Quelle: Airbus)	135
Abbildung 5-1: Anteil an Verschwendung in einem Produktionsprozess /2/	137
Abbildung 5-2: Begriffsdefinition /2/	137
Abbildung 5-3: Lean-Manufacturing-Ansätze /2/	138
Abbildung 5-4: Ansätze beim 5S-Prinzip /2/	139
Abbildung 5-5: Einordnen von Gegenständen /2/	139
Abbildung 5-6: Stufenmodell zur kontinuierlichen Verbesserung /2/	141
Abbildung 5-7: Farbkennzeichnung auf der Taktungstafel /2/	142
Abbildung 5-8: Detailanalyse der Prozessschritte /2/	143
Abbildung 5-9: Prozesssäule /2/	143
Abbildung 5-10: Beispiel für eine ungleichmäßige Taktaufteilung dargestellt über die Zeitachse /2/	144
Abbildung 5-11: Hierarchie /2/	145
Abbildung 5-12: Anzeige Andon-Prinzip /2/	146
Abbildung 5-13: SQPDC-Darstellung auf dem Teamboard /2/	147
Abbildung 5-14: 5-Säulenprinzip /2/	148
Abbildung 5-15: Checkliste für die autonome Instandhaltung /2/	149
Abbildung 5-16: Verantwortlichkeiten vor und nach der TPM-Einführung /2/	149
Abbildung 5-17: Schnittmenge /2/	150
Abbildung 5-18: Erkennen von Abweichungen /2/	151
Abbildung 5-19: 3C-Problemlösungsmodell /2/	152
Abbildung 5-20: Methoden zur Analyse der Ist-Situation /2/	152
Abbildung 5-21: Einfluss auf Qualität /2/	153
Abbildung 5-22: Poka-Yoke am Beispiel eines Montagetaktwagens (Quelle: Airbus) ...	154
Abbildung 5-23: Schiebe- und Zieh-Produktionssystem /2/	155

Abbildung 5-24: Prinzip der Kanban-Steuerung /2/	156
Abbildung 5-25: Standardisierte Arbeit /2/	157
Abbildung 5-26: Kaizen-Zyklus /2/	157
Abbildung 5-27: Führungsverhalten /2/	158
Abbildung 5-28: Blue Sky-Prinzip /2/	159
Abbildung 5-29: Dimensionen und Elemente einer Bewertung	160
Abbildung 5-30: Radar-Diagramm	161
Abbildung 6-1: Produkt-Lebenszyklus am Beispiel von Airbus-Produkten (A350, A400M, A380) /1/	162
Abbildung 6-2: Datenmanagement /19/	164
Abbildung 6-3: Prozessrestriktionen /1/	164
Abbildung 6-4: Festlegung des Prozessablaufes /1/	165
Abbildung 6-5: 2D-Layout der A400M-Montage (Quelle: Airbus)	165
Abbildung 6-6: 3D-Layout der A400M-Montagehalle (Quelle: Airbus)	166
Abbildung 6-7: Perspektive und korrektive Ergonomie /7/	167
Abbildung 6-8: Systematik einer ergonomischen Untersuchung /7/	168
Abbildung 6-9: Beispiele zur Erreichbarkeit und Montagehaltung /1/	168
Abbildung 6-10: Ablauf einer Simulationsuntersuchung /19/	170
Abbildung 6-11: Teilschritte einer Simulationsuntersuchung /19/	171
Abbildung 6-12: Warteschlangenmodell /19/	172
Abbildung 6-13: Beispiel einer Materialflusssimulation /7/	173
Abbildung 6-14: Einsparungen durch den Einsatz von digitalen Fabrikplanungswerkzeugen /1/	173
Abbildung 7-1: Zusammenspiel von Mensch, Maschine und Produkt	174
Abbildung 7-2: Häusermodell der Prozessstabilität	175

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Analyse der Organisationsformen	8
Tabelle 2-2: Maßnahmenkatalog	14
Tabelle 3-1: Maschinendaten von Tapelegeanlagen.....	30
Tabelle 3-2: Bewertungsschema und Gewichtungsfaktoren /13/.....	40
Tabelle 3-3: Leistungsdaten von Tiefbett-Gantry-Bearbeitungsmaschinen (ohne Werkzeugeingriff)	75
Tabelle 3-4: Leistungsdaten von Bearbeitungsmaschinen in Ständerbauweise (ohne Werkzeugeingriff)	75
Tabelle 3-5: Leistungsdaten von Hochbett-Bearbeitungsmaschinen	76
Tabelle 3-6: Leistungsdaten von Knickarm-Robotersystemen.....	77
Tabelle 3-7: Bauteilparameter	84
Tabelle 3-8: Parameter der Fräsbearbeitung /21/	84
Tabelle 3-9: Maschinenparameter für die Bearbeitung mit Hilfe des Abrasivwasserstrahlschneidens /21/.....	85
Tabelle 3-10: Gegenüberstellung der Bearbeitungszeiten /13/.....	85
Tabelle 3-11: Gegenüberstellung der einzelnen Fertigungsgemeinkosten /21/.....	85
Tabelle 4-1: Vor- und Nachteile einer aufgelösten Bauweise	100
Tabelle 4-2: Vor- und Nachteile einer C-Holm-Bauweise	102
Tabelle 4-3: Vor- und Nachteile einer Bauweise mit integriertem Randwinkel	103
Tabelle 4-4: Vor- und Nachteile einer voll integrierten Bauweise.....	103
Tabelle 4-5: Kennwerte einiger ausgewählter Niettypen	107
Tabelle 4-6: Darstellung der Prozessschritte /6/	126

Lebenslauf

Name: Dieter Meiners

Adresse: Essenerstr. 14
26954 Nordenham

Geburtsdatum/-ort: 04.04.1956 in Augustfehn

Familienstand: verheiratet, 1 Tochter

Berufsausbildung:

1973-1976 abgeschlossene Berufsausbildung zum Maschinenschlosser
1976-1977 Fachoberschule Rostrup
1977-1980 Fachhochschule Wilhelmshaven; Fachrichtung allgemeiner Maschinenbau, Abschluss: Dipl.-Ing.

Beruflicher Werdegang:

1980 – 1984 Airbus Deutschland GmbH, Sachbearbeiter Investitionsplanung, Nordenham

1984 – 1992 Airbus Deutschland GmbH, Leitung Planung / Investitionen, Nordenham

1992 – 1993 Airbus Deutschland GmbH, Leitung Kleinteileproduktion, Nordenham

1993 – 1995 Airbus Deutschland GmbH, Leitung Produktion, München

1995 – 2000 Airbus Deutschland GmbH, Leitung Teileproduktion, Varel

2000 – 2004 Airbus Deutschland GmbH, Leitung Manufacturing Unit Vertical Tail Plane, Stade

2004 – 2007 Airbus Deutschland GmbH, Leitung Centre of Excellence Vertical Tail Plane, Stade

Seit 01.10.2007 Airbus Deutschland GmbH, Leitung Werk und Standort Stade